

MONOGRAPHIE DU NIGER

A_ NIGER SUPÉRIEUR et BANI

II

Interprétation des résultats d'observations

Éléments caractéristiques du régime

OFFICE de la RECHERCHE
SCIENTIFIQUE et TECHNIQUE
OUTRE-MER

MISSION d'ETUDES et
d'AMENAGEMENT du NIGER

MONOGRAPHIE DU NIGER

A - NIGER Supérieur et BANI

- II -

Interprétation des
résultats d'observation

Eléments caractéristiques du régime

MONOGRAPHIE DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

2ème Volume

INTERPRETATION des RESULTATS d'OBSERVATION ELEMENTS CARACTERISTIQUES du REGIME

S O M M A I R E

	Page
Introduction	1
<u>CHAPITRE I</u>	
Etude des modules	2
I - Corrélations pluies-modules	4
A - Bassin du NIGER Supérieur	11
B - Bassin du BANI	13
II - Corrélation entre les lames d'eau écoulées aux différentes stations et les lames d'eau écou- lées à KOULIKORO	16
III - Homogénéisation des données hydrologiques	18
IV - Etude statistique des lames d'eau	19
V - Détermination des modules en un point quelconque du bassin	36
<u>CHAPITRE II</u>	
Etiages	
I - Etude du tarissement et formation des étiages	42
II - Etude statistique des étiages absolus à la station de KOULIKORO	47
III - Etiages du BANI et des affluents du NIGER Supé- rieur	49

CHAPITRE III

Etude des crues

I - Eventualités des crues du NIGER Supérieur et du BANI	57
II - Etude statistique des crues à KOULIKORO	62
III - Etude des crues sur les autres stations du NIGER Supérieur et de ses affluents	78
IV - Etude des crues dans le bassin du BANI	82
V - Généralisation des résultats	84

CHAPITRE IV

Déficits et coefficients d'écoulement ..	92
--	----

CHAPITRE V

Irrégularité interannuelle et hydraulicité

I - Irrégularité interannuelle	106
II - Signification des valeurs estimées d'après la période 1907-57	110
III - Variations d'hydraulicité au cours de la période 1907-57.....	113
IV - Comparaison des hydraulicités du NIL et du NIGER	113
V - Recherche d'une évolution possible du climat	122

CHAPITRE VI

Résumé des principales caractéristiques du régime	127
---	-----

Bibliographie sommaire	145
------------------------------	-----

Dans un premier volume, nous avons exposé les caractéristiques principales des bassins du NIGER Supérieur et du BANI, ainsi que les résultats obtenus aux différentes stations de mesures. Ces résultats ont été ordonnés suivant un plan logique, un certain nombre de valeurs caractéristiques ont été mises en évidence mais aucune interprétation n'a été tentée.

Le but de ce second volume est d'analyser de façon plus approfondie les résultats, de tenter un rapprochement entre les différentes observations tant météorologiques qu'hydrologiques, et enfin de soumettre le nouvel ensemble de données ainsi obtenues à l'analyse statistique. On peut ainsi espérer dégager des estimations numériques plus sûres pour les valeurs caractéristiques du régime du NIGER Supérieur, du BANI et de leurs affluents.

Nous verrons que, malgré l'importance de la documentation, certains points ne sont pas entièrement éclaircis : il n'en reste pas moins que le travail effectué sur le terrain par la Section Hydraulique des Travaux Publics du SOUDAN constitue l'effort le plus remarquable qui ait jamais été fait en Afrique Noire dans le domaine de l'hydrologie générale.

Dans le cadre d'une monographie aussi vaste que celle du NIGER, il n'est guère possible de faire toutes les études de détail pouvant intéresser un éventuel utilisateur. Cependant, nous espérons que ce document contiendra tous les éléments pouvant servir de base à n'importe quelle étude d'aménagement. En bien des cas, les résultats pourront être utilisés directement au calcul des ouvrages, surtout s'il s'agit de réalisations intéressant des bassins importants.

Nous étudierons successivement les modules, ou débits moyens annuels, les étiages et les crues, en nous basant sur la plus longue période possible d'observations. Nous tenterons ensuite de placer l'échantillonnage qui nous est offert dans une très longue série d'années.

C H A P I T R E I

ETUDE DES MODULES

Dans le premier volume de cette monographie, les débits moyens annuels ont été calculés directement à partir des relevés hydrométriques pour des périodes très différentes suivant la station considérée. Les années pour lesquelles on dispose d'observations exploitables sont rappelées ci-dessous, pour chacune des stations :

NIGER

NIGER à FARANAH	de 1955 à 1957	3 ans
NIGER à KOUROUSSA	1923 de 1945 à 1952 de 1954 à 1957	13 ans
NIGER à DIALAKORO	de 1952 à 1957	6 ans
NIGER à KOULIKORO	de 1907 à 1957	51 ans
NIANDAN à BARO	1913 de 1947 à 1957	12 ans
MILO à KANKAN	de 1938 à 1940 de 1942 à 1944 de 1947 à 1957	17 ans
MILO à KONSANKORO	de 1955 à 1957	3 ans
TINKISSO à TINKISSO	de 1955 à 1957	3 ans
SANKARANI à MANDIANA	de 1954 à 1957	4 ans
SANKARANI à GOUALA	de 1954 à 1957	4 ans

BANI

BAOULE à BOUGOUNI	1956 & 1957	2 ans
BAOULE à DIOILA	de 1953 à 1957	5 ans
BAGOE à PANKOUROU	1956 & 1957	2 ans
BANI à DOUNA	de 1950 à 1957	8 ans
BANI à BENENY-KEGNY	de 1953 à 1957	5 ans
BANI à SOFARA	de 1952 à 1957	6 ans

La station de KOULIKORO, observée de façon continue depuis 1907 et contrôlant la totalité du bassin que nous avons défini comme étant celui du NIGER Supérieur, est toute indiquée pour servir de base à l'étude des modules.

Partant de là, nous sommes amenés à considérer la même période (1907-1957) sur les bassins partiels constituant le NIGER Supérieur et sur les bassins partiels constituant le BANI. Il est donc nécessaire d'étendre les périodes d'observations directes aux différentes stations à la période de référence de 51 ans précitée. Pour ce faire, nous appliquerons une double méthode de corrélations.

On établira d'abord la corrélation entre les précipitations annuelles moyennes sur les bassins et les modules correspondants. Pour conserver une homogénéité physique aux formules et pour rendre les paramètres comparables entre eux, nous avons substitué aux modules la lame d'eau écoulée annuelle définie par la relation :

$$H = \frac{Q \times 31,6 \times 10^6}{1.000 S}$$

dans laquelle :

H désigne la lame d'eau équivalente au module, exprimée en mm

Q le débit moyen annuel ou module en m³/s

S la surface du bassin en km²

Par la suite, tous les calculs seront effectués sur les lames d'eau équivalentes, la traduction en débits étant faite in fine.

La méthode des corrélations pluies-débits, que nous critiquerons en détail au premier paragraphe de ce chapitre, exige le calcul de la pluviométrie moyenne sur chaque bassin pour chaque année. Ce calcul est d'autant plus aléatoire que le bassin est plus petit, la distribution des postes pluviométriques étant relativement homogène. A ce point de vue, le

NIGER à FARANAH constitue la limite extrême d'application et encore faut-il faire preuve d'un certain optimisme. Il ne nous a pas été possible d'appliquer la méthode au bassin du MILO à KONSANKORO.

Par ailleurs, et toujours avec un solide optimisme, on ne peut pousser l'étude pluviométrique en deçà de l'année 1923. Pour continuer l'extension de la période d'observations, il a fallu établir les corrélations entre les modules des différentes stations et ceux du NIGER à KOULIKORO ; les résultats obtenus ne tiennent alors compte que de l'hydraulicité générale de la zone Haut-NIGER - BANI et non plus de la pluviosité particulière de chaque bassin partiel. Ces résultats peuvent cependant être retenus, faute de mieux, dans le cas particulier du NIGER et du BANI, ainsi que le montrent les années d'observations simultanées.

Ayant ainsi "homogénéisé" les données des différents bassins, on pourra aborder une étude statistique sommaire, mais suffisante, pour préciser les principales valeurs caractéristiques concernant l'abondance des cours d'eau.

I - CORRELATIONS PLUIES - MODULES

Le problème général de la relation pluies - débits est loin d'être résolu. De nombreux auteurs pensent qu'elle doit être d'allure parabolique. C'est également notre opinion, mais il se trouve qu'en régime tropical de transition, pour lequel les pluies sont relativement abondantes, la partie intéressante de la courbe $Q(P)$ se situe suffisamment loin de l'origine pour que l'on puisse admettre une relation linéaire, ce qui simplifie beaucoup les calculs.

Ce n'est d'ailleurs pas là que réside la principale difficulté. La dispersion des points expérimentaux est autrement inquiétante. Cette dispersion est due à deux séries de facteurs :

1°) Les erreurs d'observation et d'estimation

a) Les débits sont généralement mesurés avec une assez bonne précision et une critique sévère des relevés limnimétriques permet d'éliminer les erreurs,

tout au moins les plus grossières, dues aux observateurs. Sans être négligeables, les écarts dus aux calculs de débits sont loin d'être prépondérants.

b) Il n'en est pas de même du calcul des précipitations moyennes. Aux erreurs d'observations vient s'ajouter l'hétérogénéité fondamentale des pluies qui exigerait un nombre considérable de pluviomètres pour obtenir un calcul aussi précis que celui des débits. En outre, on est rarement sûr qu'un poste d'observation soit bien représentatif de la zone d'influence qu'on lui attribue lors des calculs. Cette cause de dispersion est d'autant plus sensible que le bassin est plus petit (comportant ainsi un nombre moins élevé de stations) et plus accidenté.

2°) Les erreurs de principe sur une relation Q (P)

Cette relation, en admettant que les éléments soient parfaitement connus, n'est pas une relation certaine. Des facteurs autres que la précipitation moyenne annuelle interviennent dans la détermination du module. Pour un même bassin, on peut admettre que les facteurs topographiques et géologiques sont constants d'une année à l'autre. Ceci est déjà moins exact pour la végétation. Quant aux facteurs climatiques pouvant influencer l'abondance annuelle, l'amplitude de leurs variations d'une année à l'autre diffère suivant leur nature.

Les températures moyennes de l'air, pour une même période de l'année, ne donnent pas lieu à des écarts importants. La durée d'insolation, par contre, est plus variable. Mais le facteur climatique perturbant le plus la relation pluies-débits se rapporte à la distribution des pluies dans le temps. Nous avons introduit, lors d'études hydrologiques particulières, la notion d'indice de dispersion des pluies, valable pour les régimes qui ne comportent qu'une saison des pluies, comme c'est le cas des régimes tropicaux. Les résultats obtenus avaient été encourageants. La mise en oeuvre de cet indice conduit toutefois à des calculs laborieux qui font exclure son emploi dans une monographie aussi extensive que celle-ci ; d'autre part, dans le cas qui nous occupe, les erreurs fortuites sur le calcul des pluies moyennes mensuelles semblent rendre illusoire l'utilisation de cet indice de dispersion.

On se contentera donc d'estimer au mieux les paramètres d'une formule linéaire de corrélation que nous avons mise sous la forme :

$$H = K (P - P_0)$$

H désignant la lame d'eau annuelle écoulée exprimée en mm et P la pluviométrie moyenne de l'année également exprimée en mm.

Le calcul de P correspondant à chaque année pour chaque bassin a été effectué en traçant et en planimétrant les réseaux d'isohyètes annuelles de 1923 à 1957. Le tracé de chaque réseau d'isohyète a été établi à partir du tableau des précipitations dressé pour le calcul de la pluviométrie interannuelle, en se conformant toujours aux mêmes directives générales, de façon à rendre le plus aléatoires possible les erreurs d'estimation.

Les résultats sont réunis dans le Tableau I pour le NIGER Supérieur et dans le Tableau II pour le bassin du BANI. Les pluviométries moyennes du BANIFING à KOUORO sont données à toutes fins utiles ; n'ayant pas de débits valables à cette station, nous ne les exploiterons pas.

On peut admettre vraisemblablement que les écarts entre valeurs calculées et valeurs réelles sont distribués suivant la loi normale des erreurs. Dans ce cas, l'estimation "au mieux" des paramètres peut se faire par la méthode des moindres carrés. Les valeurs des paramètres sont alors données pour chaque bassin par les équations :

$$K = \frac{\sum H_i P_i - \frac{1}{n} \sum H_i \sum P_i}{\sum P_i^2 - \frac{(\sum P_i)^2}{n}}$$

$$P_0 = \frac{\sum P_i}{n} - \frac{1}{K} \frac{\sum H_i}{n}$$

TABLEAU I

BASSIN DU NIGER SUPERIEUR

Pluviométries moyennes annuelles
pour chaque bassin partiel

=====									
NIGER					NIAND.	MILO	SANKARANI	TINKIS	
Année	FARAN.	KOUROUS.	DIALAK.	KOULIK.	BARO	KANKAN	MANDIA.	GOUAL.	TINKIS.

1957	2 060	1 905	1 810	1 750	2 030	1 960	1 850	1 770	1 740
1956	1 710	1 585	1 560	1 450	1 750	1 575	1 375	1 355	1 525
1955	1 890	1 775	1 775	1 610	2 120	1 908	1 565	1 485	1 740
1954	2 230	2 105	1 955	1 820	2 145	2 100	1 875	1 775	1 785
1953	2 365	2 035	1 830	1 735	2 125	1 965	1 850	1 735	1 565
1952	1 840	1 665	1 590	1 510	1 895	1 735	1 590	1 515	1 425
1951	2 240	2 000	1 850	1 735	2 080	1 975	1 850	1 790	1 865
1950	1 530	1 480	1 490	1 465	1 640	1 505	1 365	1 435	1 570
1949	1 800	1 630	1 660	1 585	2 070	1 970	1 740	1 645	1 440
1948	1 795	1 745	1 780	1 625	1 890	2 000	1 630	1 580	1 720
1947	1 500	1 385	1 570	1 490	1 970	2 105	1 670	1 525	1 220
1946	1 920	1 800	1 695	1 590	1 850	1 820	1 670	1 570	1 665
1945	1 950	1 755	1 617	1 565	1 850	1 800	1 680	1 620	1 555
1944	1 700	1 460	1 490	1 390	1 860	1 910	1 450	1 370	1 280
1943	1 765	1 745	1 620	1 520	1 785	1 755	1 630	1 500	1 760
1942	1 820	1 630	1 495	1 420	1 745	1 750	1 490	1 430	1 455
1941	1 790	1 520	1 510	1 460	1 920	1 890	1 720	1 600	1 427
1940	1 880	1 670	1 520	1 400	1 830	1 710	1 400	1 330	1 300
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

NIGER					NIAND.	MILO	SANKARANI	TINKIS	
Année:	FARAN.	KOUROUS.	DIALAK.	KOULIK.	BARO	KANKAN.	MANDIA.	GOUAL.	TINKIS
1939:	1 615:	1 500	1 515	1 450	1 820:	1 780:	1 600	1 500:	1 420
1938:	2 140:	1 910	1 820	1 640	2 260:	2 010:	1 570	1 520:	1 650
1937:	1 930:	1 725	1 700	1 560	2 100:	1 905:	1 620	1 540:	1 480
1936:	1 805:	1 640	1 700	1 635	2 050:	1 935:	1 685	1 632:	1 400
1935:	1 900:	1 670	1 510	1 450	1 680:	1 630:	1 410	1 390:	1 435
1934:	2 015:	1 815	1 665	1 530	1 900:	1 795:	1 540	1 435:	1 525
1933:	2 050:	1 810	1 850	1 765	2 240:	2 400:	1 965	1 800:	1 500
1932:	2 075:	1 965	1 875	1 765	2 155:	2 170:	1 880	1 750:	1 635
1931:	1 870:	1 680	1 670	1 630	1 995:	2 040:	1 745	1 680:	1 455
1930:	1 850:	1 790	1 810	1 635	2 075:	2 055:	1 620	1 550:	1 725
1929:	1 890:	1 755	1 754	1 700	1 970:	2 010:	1 835	1 735:	1 650
1928:	1 960:	1 820	1 870	1 760	2 235:	2 195:	1 800	1 740:	1 630
1927:	1 922:	1 835	1 815	1 685	1 755:	1 995:	1 777	1 690:	1 880
1926:	1 900:	1 710	1 615	1 550	1 950:	1 930:	1 720	1 605:	1 420
1925:	2 125:	1 900	1 890	1 740	2 030:	2 225:	1 915	1 740:	1 400
1924:	1 800:	1 725	1 785	1 685	2 015:	1 965:	1 820	1 695:	1 945
1923:	2 040:	1 745	1 690	1 550	2 125:	1 965:	1 610	1 505:	1 490

TABLEAU II

BASSIN DU BANI

Pluviométries moyennes annuelles
pour chaque bassin partiel

	BAOULE		BAGOE	BANIF.		BANI	
Année	BOUGOUNI	DIOILA	PANKOUROU	KOUORO	DOUNA	BEN.KEGNY	SOFARA
1957	1 775	1 535	1 565	1 205	1 410	1 340	1 300
1956	1 355	1 240	1 240	1 080	1 155	1 115	1 070
1955	1 420	1 280	1 460	1 420	1 385	1 340	1 300
1954	1 760	1 530	1 615	1 365	1 475	1 415	1 380
1953	1 720	1 455	1 570	1 440	1 400	1 345	1 290
1952	1 500	1 415	1 465	1 100	1 270	1 200	1 140
1951	1 650	1 450	1 650	1 410	1 465	1 415	1 353
1950	1 485	1 455	1 620	1 300	1 450	1 390	1 350
1949	1 525	1 285	1 285	1 045	1 190	1 140	1 080
1948	1 440	1 205	1 330	1 130	1 165	1 110	1 060
1947	1 265	1 120	1 150	958	1 030	1 010	960
1946	1 565	1 305	1 370	1 190	1 230	1 185	1 140
1945	1 615	1 340	1 380	1 088	1 230	1 175	1 135
1944	1 265	1 090	1 200	1 100	1 080	1 050	1 025
1943	1 370	1 240	1 225	1 130	1 180	1 150	1 120
1942	1 350	1 255	1 235	1 080	1 165	1 125	1 090
1941	1 480	1 340	1 370	1 058	1 180	1 140	1 090
1940	1 290	1 130	1 120	935	1 040	990	960

	BAOULE	BAGOE	BANIF.	BANI	
Année:	BOUGOUNI:	DIOILA:	PANKOUROU:	KOUORO:	DOUNA: BEN. KEGNY: SOFARA:
1939:	1 495	1 305	1 435	1 200:1 290:	1 240 : 1 200:
1938:	1 440	1 295	1 335	1 130:1 235:	1 210 : 1 120:
1937:	1 495	1 300	1 405	1 135:1 235:	1 175 : 1 150:
1936:	1 500	1 375	1 330	1 170:1 270:	1 220 : 1 175:
1935:	1 355	1 335	1 395	1 267:1 290:	1 225 : 1 160:
1934:	1 290	1 060	1 265	1 100:1 075:	1 035 : 1 000:
1933:	1 600	1 385	1 585	1 285:1 380:	1 325 : 1 285:
1932:	1 590	1 340	1 390	1 100:1 220:	1 160 : 1 115:
1931:	1 620	1 460	1 555	1 280:1 420:	1 340 : 1 280:
1930:	1 420	1 210	1 310	1 110:1 160:	1 090 : 1 070:
1929:	1 695	1 445	1 615	1 315:1 410:	1 335 : 1 280:
1928:	1 610	1 425	1 420	1 280:1 310:	1 245 : 1 190:
1927:	1 525	1 400	1 485	1 322:1 380:	1 315 : 1 270:
1926:	1 490	1 260	1 370	1 140:1 190:	1 140 : 1 065:
1925:	1 490	1 260	1 460	1 230:1 260:	1 210 : 1 170:
1924:	1 610	1 455	1 450	1 280:1 400:	1 325 : 1 275:
1923:	1 410	1 205	1 395	1 110:1 200:	1 155 : 1 120:

Le couple (H_i, P_i) désigne la lame d'eau et la pluviométrie concomitante pour une année quelconque. Les sommations sont étendues à l'ensemble des années d'observations simultanées des pluies et des débits : n désigne le nombre de ces années. Dans les calculs suivants, quelques années, très rares, ont été éliminées pour certaines stations, par suite du caractère nettement aberrant des résultats d'observations.

A - Bassin du NIGER Supérieur

1°) NIGER à FARANAH

Nous disposons de 3 années d'observations simultanées, de 1955 à 1957, pour ajuster les coefficients K et P_0 . Ce serait très nettement insuffisant et il faudrait renoncer à appliquer la méthode si ces trois années ne contenaient heureusement une année très faible (1956) et deux années fortes. Cette remarque est valable pour les autres bassins du NIGER et du BANI exploités depuis deux ou trois ans seulement.

On trouve comme formule de corrélation :

$$H_{mm} = 0,98 (P_{mm} - 1108)$$

2°) NIGER à KOUROUSSA

Ont été utilisées les périodes suivantes :

1923
1945 à 1952
1956 & 1957

Les années 1954 et 1955 présentent une dispersion dont la cause ne peut être décelée : elles ont été éliminées. Pour le reste, la corrélation est acceptable.

Les calculs ont donné la relation :

$$H_{mm} = 0,438 (P_{mm} - 740)$$

3°) NIGER à DIALAKORO

Les 6 années d'observations simultanées (1952 - 1957) ont été utilisées pour l'estimation des

paramètres. On trouve :

$$H_{mm} = 0,625 (P_{mm} - 800)$$

4°) NIGER à KOULIKORO

Bien qu'il ne soit pas nécessaire d'étudier la corrélation pluies-débits à KOULIKORO pour l'étude des modules, on a cependant jugé utile de le faire. L'amplitude de la période d'observations (51 ans) permet en effet de se rendre compte de la précision qu'on peut attendre de la méthode des corrélations. En fait, les points représentatifs des couples d'observations simultanées semblent bien se répartir approximativement, suivant la loi normale des écarts de part et d'autre de la droite de corrélation. L'équation de cette droite est :

$$H_{mm} = 0,651 (P_{mm} - 932)$$

5°) NIANDAN à BARO

La période s'étend de 1947 à 1957. Les années 1947 et 1949 présentant des résultats aberrants, ont été éliminées. Pour les 9 années ayant servi au calcul des paramètres, la corrélation est très satisfaisante. On trouve :

$$H_{mm} = 0,77 (P_{mm} - 1030)$$

6°) MILO à KANKAN

Les années 1947 et 1948 ont été écartées. Pour les 15 années restantes (1939-40, 1942-44, 1949-57), la corrélation est assez lâche. On peut cependant l'utiliser. L'équation de la droite moyenne est :

$$H_{mm} = 0,473 (P_{mm} - 387)$$

7°) SANKARANI à MANDIANA

Malgré la courte période d'observations simultanées, quatre années : de 1954 à 1957, on peut estimer approximativement les paramètres.

$$H_{mm} = 0,320 (P_{mm} - 172)$$

8°) SANKARANI à GOUALA

L'approximation est analogue à la précédente.
On trouve la relation :

$$H_{mm} = 0,298 (P_{mm} - 256)$$

9°) TINKISSO à TINKISSO

L'estimation des paramètres est basée sur trois observations seulement, 1955 à 1957. Le calcul par la méthode des moindres carrés donne un P_0 négatif. Cela n'est pas impossible à priori mais nous semble curieux pour cette station. On a jugé préférable de faire passer la courbe par l'origine. L'équation de corrélation devient :

$$H_{mm} = 0,27 P_{mm}$$

Sur le graphique 1, on peut se rendre compte de la dispersion des points pour les différents bassins versants.

B - Bassin du BANI

1°) BAOULE à BOUGOUNI

On ne possède que deux années de relevés simultanés. Même remarque que pour FARANAH. L'équation de la droite est :

$$H_{mm} = 0,484 (P_{mm} - 920)$$

2°) BAOULE à DIOILA

Les 5 années d'observations simultanées (1953-57) donnent une corrélation acceptable :

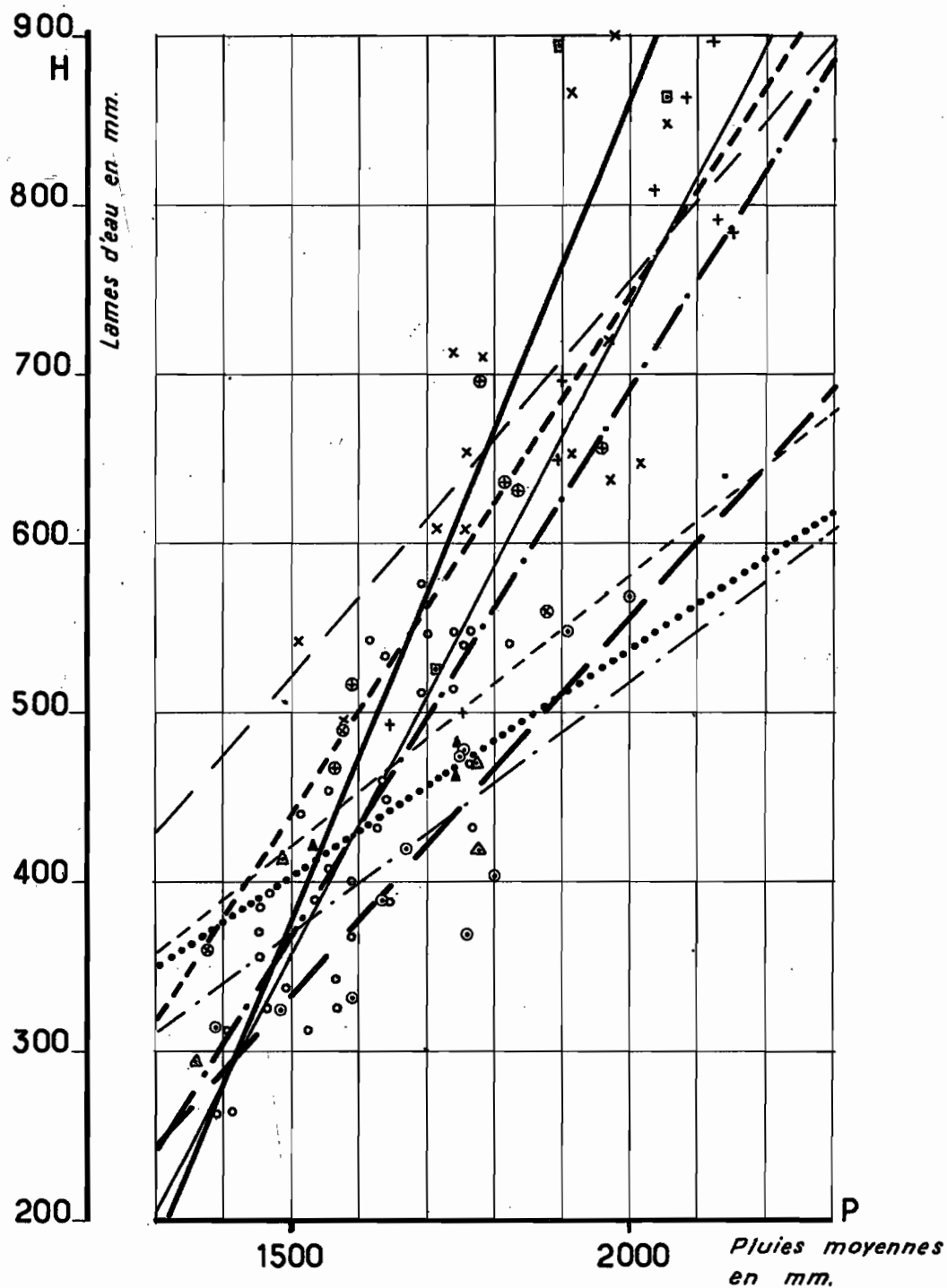
$$H_{mm} = 0,307 (P_{mm} - 593)$$

3°) BAGOE à PANKOUROU

On dispose seulement de deux couples de valeurs pour 1956 et 1957. Même remarque que pour

Corrélations Pluies - Lames d'eau écoulées

- | | | | |
|---------------|-------------------|---------------|----------------------|
| □ ————— □ | Niger à Faranah | + ————— + | Niandan à Baro |
| ○ ————— ○ | Niger à Kouroussa | x ————— x | Milo à Kankan |
| ⊕ ————— ⊕ | Niger à Dialakoro | ⊗ ————— ⊗ | Sankarany à Mandiana |
| ○ - - - - - ○ | Niger à Koulikoro | △ ————— △ | Sankarany à Gouala |
| | | ▲ ········· ▲ | Tinkisso à Tinkisso |



NIG. 8271

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED: A. 26.3. 59

LE: Mars 59

DES: Grotard

VISA:

TUBE N°:

AO

FARANAH. L'équation de la droite est :

$$H_{mm} = 0,465 (P_{mm} - 801)$$

4°) BANI à DOUNA

La période d'observations simultanées porte sur 8 ans (1950-57). La dispersion des points est assez forte, ce qui nous a conduit à éliminer quelques années. On trouve en définitive :

$$H_{mm} = 0,324 (P_{mm} - 600)$$

5°) BANI à BENENY-KEGNY

La corrélation, satisfaisante, a été obtenue au moyen de 5 couples d'observations portant sur les années 1953 à 1957. L'équation de la droite est :

$$H_{mm} = 0,357 (P_{mm} - 676)$$

6°) BANI à SOFARA

On possède 6 années d'observations simultanées (1952-1957). Pour SOFARA, le décalage entre l'année hydrologique et l'année sur laquelle sont calculés les modules devient important. La corrélation entre les données ainsi établies est cependant très nette. De même que pour le TINKISSO, les paramètres estimés par la méthode des moindres carrés ont été légèrement retouchés pour tenir compte de l'année 1952 qui nous paraît légèrement aberrante. On admettra comme formule de corrélation :

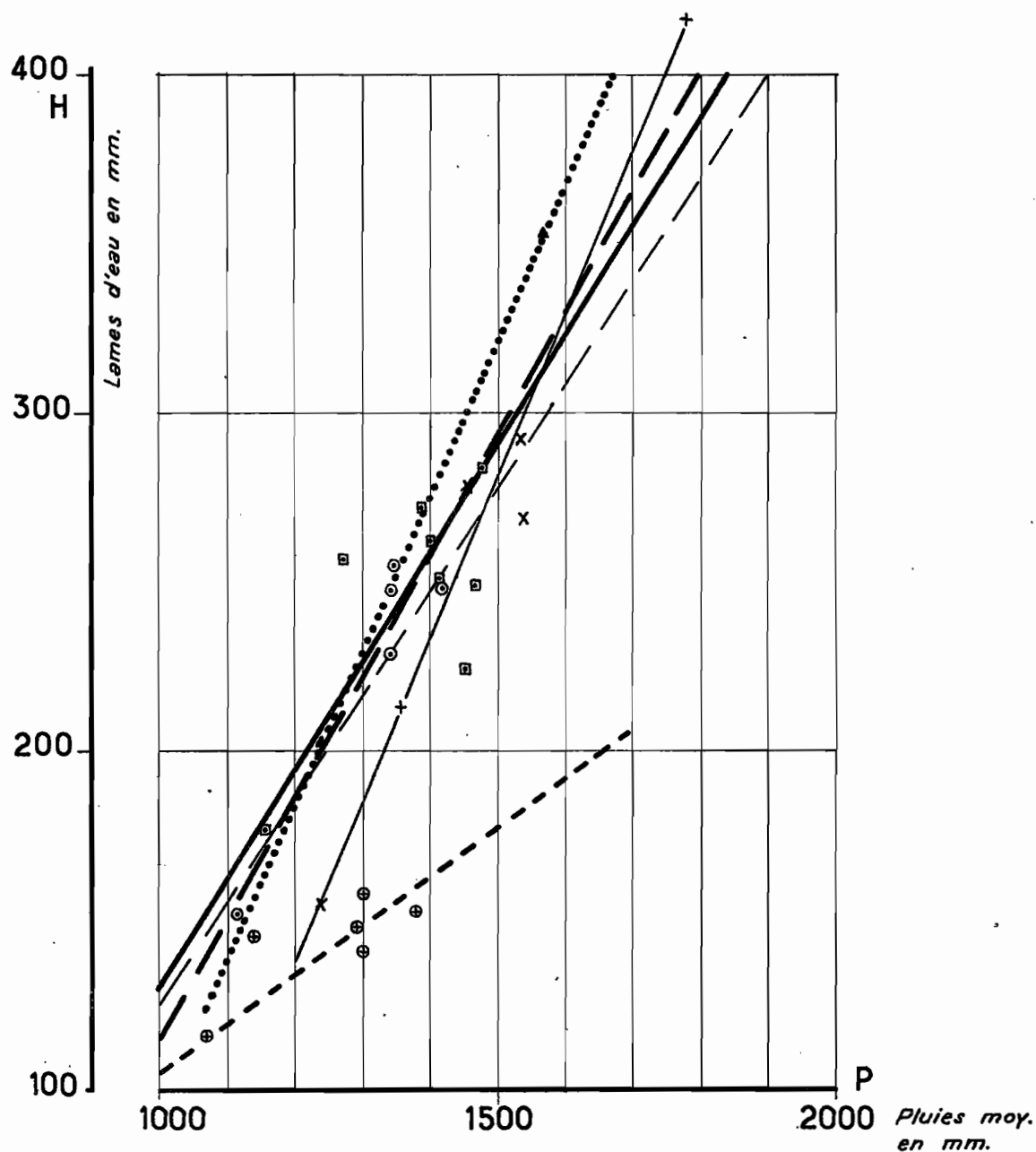
$$H_{mm} = 0,147 (P_{mm} - 290)$$

Les différentes courbes de corrélation ainsi que les points représentatifs des observations ayant servi à les établir figurent sur le graphique 2. Les résultats des calculs sont groupés dans le tableau III.

Il ne faut pas trop s'attacher à donner une signification physique aux paramètres K et P_0 . En effet, il est probable que la relation correcte entre pluies moyennes et lames d'eau écoulées n'est pas linéaire. L'approximation que nous avons faite en vue de simplifier les calculs, si elle est admissible en ce

Corrélations Pluies-Lames d'eau écoulées

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| □ ————— □ Bani à Douna | + ————— + Baoulé à Bougoumi |
| ○ ————— ○ Bani à Bénény Kégné | x ————— x Baoulé à Dioïla |
| ⊕ - - - - - ⊕ Bani à Sofara | ▲ ▲ Bagoé à Pankourou |



NIG. 8272

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED:

LE: Mars 59

DES: Grottard

VISA:

TUBE N°:

AO

TABLEAU III

NIGER SUPERIEUR et BANI

CORRELATIONS PLUIES - LAMES D'EAU
Coefficients de la formule $H = K (P - P_0)$

Rivière	Station	K	P ₀	Formule	Surf. B.V. km ²
NIGER	FARANAH	0,98	1 108	0,98 (P - 1 108)	3 180
	KOUROUSSA	0,438	740	0,438 (P - 740)	18 000
	DIALAKORO	0,625	800	0,625 (P - 800)	71 000
	KOULIKORO	0,651	932	0,651 (P - 932)	120.000
NIANDAN	BARO	0,77	1 030	0,77 (P - 1 030)	12.600
MILO	KANKAN	0,473	387	0,473 (P - 387)	9.900
SANKARANI	MANDIANA	0,320	172	0,320 (P - 172)	21.900
	GOUALA	0,298	256	0,298 (P - 256)	35.300
TINKISSO	TINKISSO	0,270	0	H = 0,27 P	6.400
BAOULE	BOUGOUNI	0,484	920	H = 0,484 (P-920)	15.700
	DIOILA	0,307	593	H = 0,307 (P-593)	32.500
BAGOE	PANKOUROU	0,465	801	H = 0,465 (P-801)	31.800
BANI	DOUNA	0,324	600	H = 0,324 (P-600)	101.600
	BENENY-KEGNY	0,357	676	H = 0,357 (P-676)	116.000
	SOFARA	0,147	290	H = 0,147 (P-290)	129.400

qui concerne la précision des résultats, enlève toute signification physique aux valeurs de P_0 . Le coefficient K semble être lié à la pente moyenne du bassin, sans qu'il soit possible, au stade de notre étude, de préciser comment.

On remarquera les pentes plus fortes des droites relatives au bassin du NIGER, hormis le SANKARANI et le TINKISSO, par rapport à celle du BANI. Quant à la pente très faible qui correspond au BANI à SOFARA, elle s'explique aisément par la traversée des zones marécageuses, régulatrices du débit.

En outre, toutes choses égales par ailleurs, la valeur de K devrait être d'autant plus grande que la superficie du bassin est plus faible (exemple de FARANAH). D'autres écarts s'expliquent également par des singularités du bassin ou du réseau hydrographique, mais, nous le répétons, il serait illusoire de rechercher une signification physique précise à la valeur de P_0 .

II - CORRELATION ENTRE LES LAMES D'EAU ECOULEES AUX DIFFERENTES STATIONS ET LES LAMES D'EAU ECOULEES A KOULIKORO.

On a vu que la relation pluies-modules ne permet pas de reconstituer les lames d'eau à chaque station pour la totalité de la période de 51 ans sur laquelle portent les relevés à KOULIKORO, d'où la nécessité de rechercher les corrélations entre les modules à KOULIKORO et aux autres stations. A priori, cette corrélation est de qualité inférieure à la précédente car elle ne tient pas compte des variations de pluviosité propres à chaque bassin. Seuls les résultats obtenus en comparant les modules simultanés justifient l'emploi purement empirique de cette méthode.

Là encore, la surface du bassin intervient pour la validité des coefficients estimés; plus les bassins comparés ont des superficies dissemblables, moins les résultats sont précis. Les différences entre les diverses zones climatiques interviennent également, surtout lorsque l'on compare les observations aux stations du BANI avec celles de KOULIKORO. Néanmoins, l'expérience montre que les corrélations sont généralement

acceptables. Il faut en déduire que nous nous trouvons dans un cas particulièrement favorable, ce que laissait prévoir le caractère relativement homogène de la pluviosité annuelle dans toute la zone couvrant l'ensemble des deux bassins, malgré des hauteurs pluviométriques variant de 600 à plus de 2.000 mm.

Il est inutile, dans l'application de cette méthode, encore plus que pour l'étude des corrélations pluies-débits, de rechercher des formes analytiques compliquées. Aussi avons-nous admis une relation linéaire de la forme.

$$H = K_1 (H_k - H_0)$$

dans laquelle H désigne la lame d'eau écoulée pendant une année donnée à une station quelconque et H_k la lame d'eau écoulée la même année à KOULIKORO. K_1 et H_0 sont les paramètres d'ajustement. Ces paramètres ont été calculés par la méthode des moindres carrés suivant les formules :

$$K_1 = \frac{\sum H_i H_{ki} - \frac{1}{n} \sum H_i \sum H_{ki}}{\sum H_{ki}^2 - \frac{1}{n} (\sum H_{ki})^2}$$

$$H_0 = \frac{\sum H_{ki}}{n} - \frac{1}{K_1} \frac{\sum H_i}{n}$$

(H_i, H_{ki}) désigne un couple d'observations simultanées à la station (H_i) et à KOULIKORO (H_{ki}) .

Nous donnons ci-après, sans commentaires, les différentes formules obtenues :

Bassin du NIGER :

NIGER à FARANAH	$H_{mm} = 2,07 (H_{k\ mm} - 117)$
NIGER à KOUROUSSA	$H_{mm} = 1,07 (H_{k\ mm} - 23)$
NIGER à DIALAKORO	$H_{mm} = 1,21\ H_{k\ mm}$
NIGER à KOULIKORO	Station de référence
NIANDAN à BARO	$H_{mm} = 1,5\ H_{k\ mm}$
MILO à KANKAN	$H_{mm} = 0,97 (H_{k\ mm} + 300)$
SANKARANI à MANDIANA	$H_{mm} = 0,93 (H_{k\ mm} + 15)$
SANKARANI à GOUALA	$H_{mm} = 0,82 (H_{k\ mm} - 12)$
TINKISSO à TINKISSO	$H_{mm} = 0,30 (H_{k\ mm} + 1.032)$

Bassin du BANI :

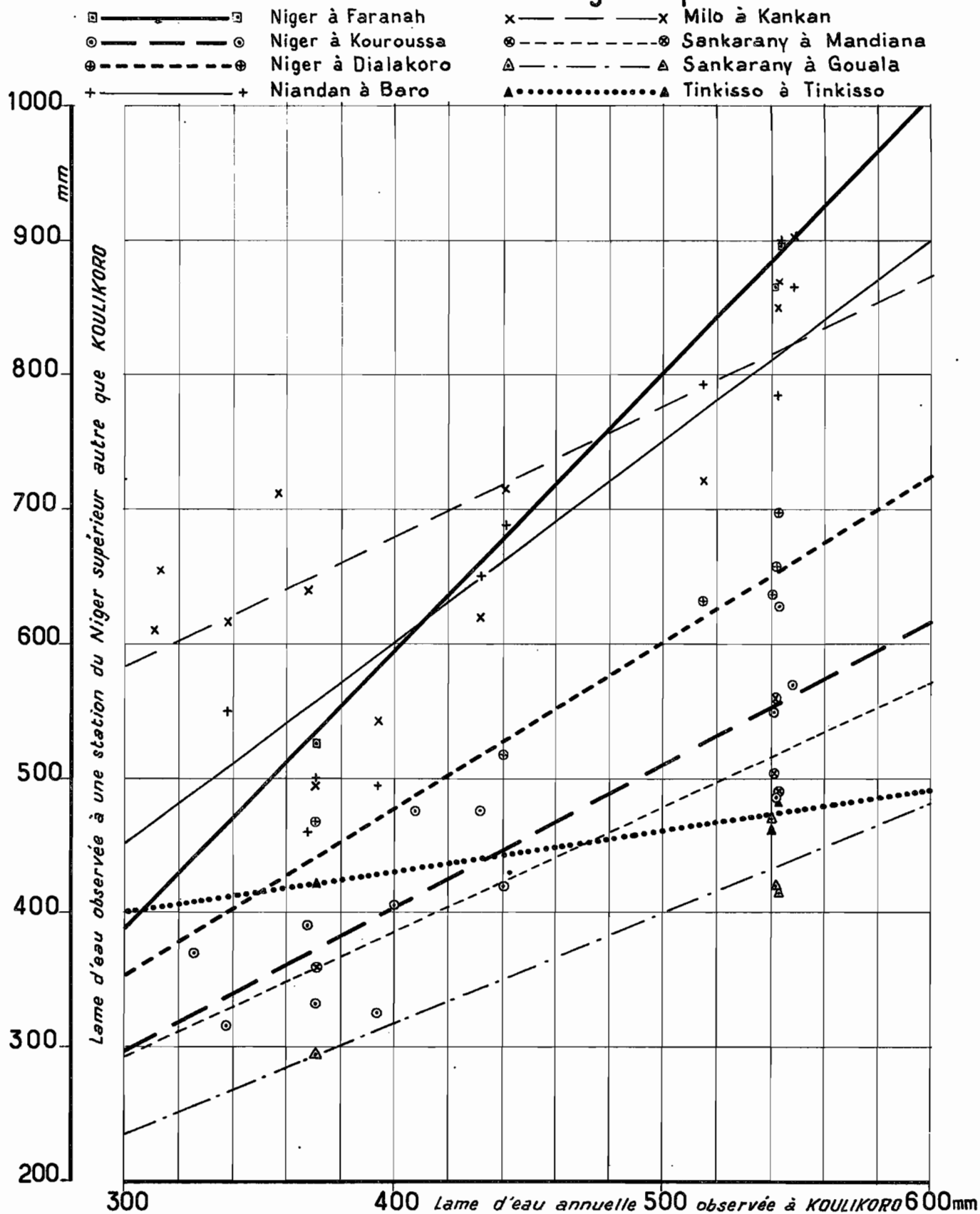
BAOULE à BOUGOUNI	$H_{mm} = 1,2 (H_{k\ mm} - 193)$
BAOULE à DIOILA	$H_{mm} = 0,70 (H_{k\ mm} - 145)$
BAGOE à PANKOUROU	$H_{mm} = 0,89 (H_{k\ mm} - 144)$
BANI à DOUNA	$H_{mm} = 0,37 (H_{k\ mm} + 181)$
BANI à BENENY-KEGNY	$H_{mm} = 0,32 (H_{k\ mm} + 195)$
BANI à SOFARA	$H_{mm} = 0,18 (H_{k\ mm} + 304)$

Les droites de corrélations et les points représentatifs des couples d'observations simultanées figurent sur les graphiques 3 (NIGER) et 4 (BANI).

III - HOMOGENEISATION DES DONNEES HYDROLOGIQUES

Les formules de corrélations établies au premier et au second paragraphes de ce chapitre, vont permettre d'étendre les données enregistrées à chaque station et portant sur un nombre plus ou moins grand

Corrélations entre les lames d'eau annuelles observées à KOULIKORO et aux autres stations du Niger supérieur



NIG. 8273

ELECTRICITÉ DE FRANCE . SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED:

LE: Mars 59

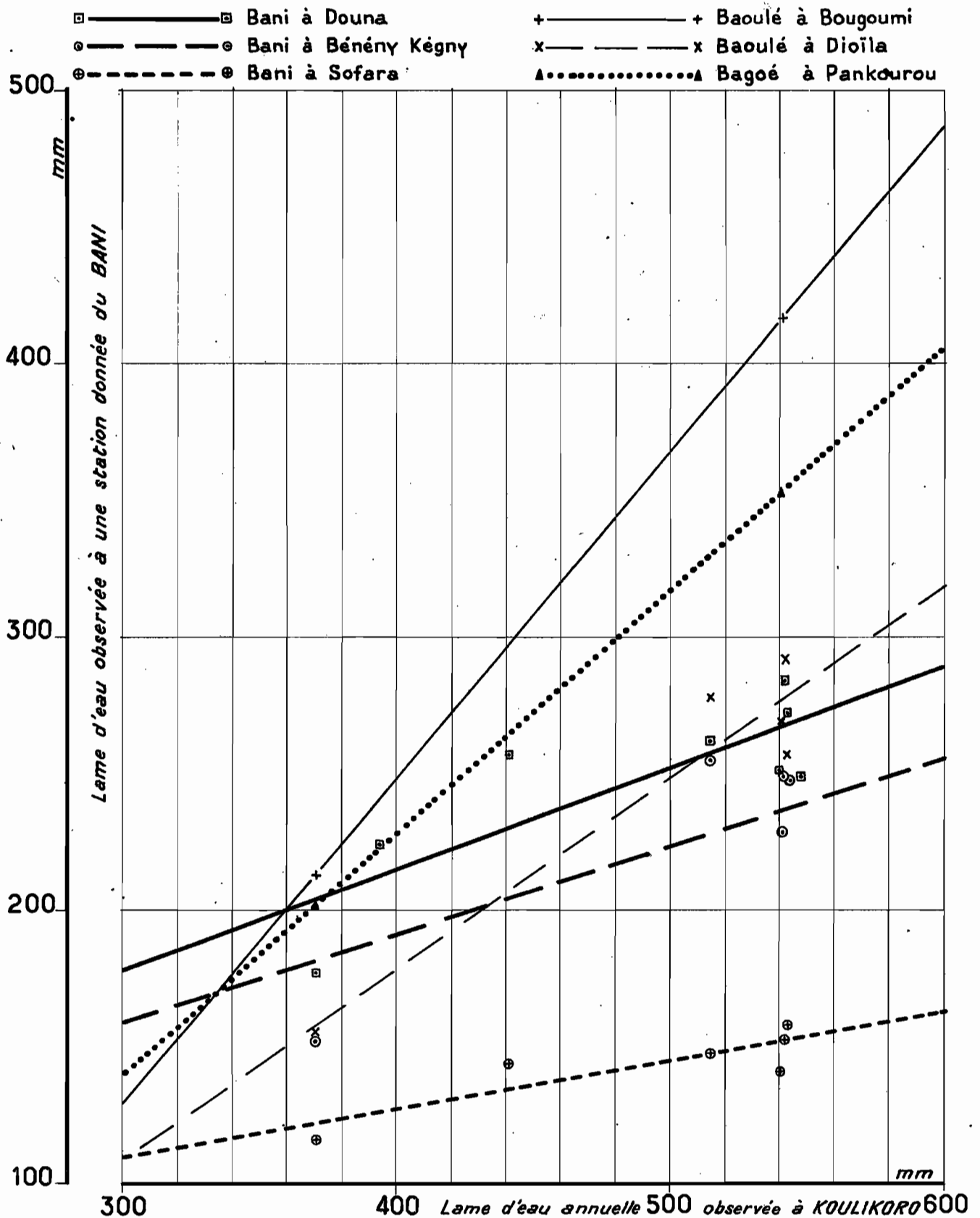
DES: Grottard

VISA:

TUBE N°:

AO

Corrélations entre les lames d'eau annuelles observées à KOULIKORO et aux stations du Bani



NIG 8274

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED:

LE: Mars 59

DES: Grotard

VISA:

TUBE N°:

AO

d'années, à une période uniforme de 51 ans (1907-1957) correspondant à la durée des observations hydrologiques effectuées sur le NIGER à KOULIKORO.

De 1923 à 1957, les lames d'eau écoulées annuelles, non directement observées, ont été calculées à partir des corrélations pluies-débits.

De 1907 à 1922, les renseignements pluviométriques sont insuffisants pour permettre la reconstitution des lames d'eau : on a fait appel aux formules de corrélation du second type.

Le tableau IV contient les lames d'eau observées (soulignées) et calculées concernant les différents bassins du NIGER Supérieur.

Les résultats relatifs au BANI, sont consignés dans le tableau V.

IV - ETUDE STATISTIQUE DES LAMES D'EAU (1)

Nous disposons ainsi, pour chacune des 15 stations étudiées du NIGER Supérieur et du BANI, d'un échantillonnage de valeurs portant sur une période de 51 ans. Notons au passage que certains résultats bruts provenant des calculs précédents ont dû être légèrement retouchés : ceci concerne uniquement les très faibles modules du BAOULE pour lesquels il n'est plus possible d'admettre une corrélation linéaire avec les modules de KOULIKORO.

Pour chacune des stations, les lames d'eau ont été classées par ordre décroissant et les fréquences expérimentales au dépassement calculées d'après la formule :

$$F = \frac{n - \frac{1}{2}}{N}$$

dans laquelle n est le rang de classement de la valeur dont on détermine la fréquence et N le nombre d'unités contenues dans l'échantillon.

Cette formule que nous utilisons fréquemment est préférée à la définition classique $F = \frac{n}{N}$ parce qu'elle donne des valeurs complémentaires pour les fré-

(1)-Cette étude ne porte que sur les valeurs centrales de la distribution. Il conviendrait, pour une application, d'étudier le degré de confiance à accorder aux éléments statistiques estimés.

TABLEAU IV

BASSIN DU NIGER SUPERIEUR

Lames d'eau écoulées annuelles
pour chaque bassin versant partiel

	NIGER				NIAND.	MILO	SANKARANI		TINKIS.
Année:	FARAN.	KOUROUS.	DIALAK.	KOULIK.	BARO	KANKAN	MANDIA.	GOUAL.	TINKIS.
1957:	<u>865</u>	<u>549</u>	<u>636</u>	<u>541</u>	<u>810</u>	<u>701</u>	<u>503</u>	<u>470</u>	<u>462</u>
1956:	<u>526</u>	<u>332</u>	<u>467</u>	<u>371</u>	(500)	<u>494</u>	<u>359</u>	<u>294</u>	<u>421</u>
1955:	<u>895</u>	<u>628</u>	<u>697</u>	<u>543</u>	<u>898</u>	<u>867</u>	<u>490</u>	<u>414</u>	<u>482</u>
1954:	090	<u>485</u>	<u>657</u>	<u>542</u>	<u>785</u>	<u>849</u>	<u>560</u>	<u>419</u>	482
1953:	233	<u>632</u>	<u>631</u>	<u>515</u>	<u>793</u>	<u>721</u>	537	<u>441</u>	422
1952:	717	<u>420</u>	<u>517</u>	<u>441</u>	<u>687</u>	<u>714</u>	454	<u>375</u>	385
1951:	110	<u>570</u>	<u>656</u>	<u>548</u>	<u>865</u>	<u>902</u>	537	<u>457</u>	503
1950:	414	<u>325</u>	<u>431</u>	<u>394</u>	<u>494</u>	<u>542</u>	382	<u>352</u>	424
1949:	678	<u>390</u>	<u>538</u>	<u>368</u>	<u>459</u>	<u>638</u>	502	<u>414</u>	389
1948:	673	<u>475</u>	<u>613</u>	<u>432</u>	<u>650</u>	<u>618</u>	467	<u>395</u>	464
1947:	384	<u>315</u>	<u>481</u>	<u>338</u>	<u>550</u>	<u>615</u>	479	<u>378</u>	329
1946:	796	<u>405</u>	<u>559</u>	<u>400</u>	632	<u>678</u>	479	<u>392</u>	449
1945:	826	<u>370</u>	<u>511</u>	<u>326</u>	632	<u>668</u>	482	<u>407</u>	419
1944:	580	<u>316</u>	<u>431</u>	<u>263</u>	639	<u>654</u>	409	<u>332</u>	346
1943:	644	<u>491</u>	<u>513</u>	<u>313</u>	582	<u>654</u>	467	<u>371</u>	475
1942:	697	<u>386</u>	<u>434</u>	<u>265</u>	551	<u>609</u>	486	<u>350</u>	393
1941:	669	<u>342</u>	<u>444</u>	<u>325</u>	678	<u>711</u>	496	<u>401</u>	385
1940:	757	<u>407</u>	<u>450</u>	<u>311</u>	616	<u>609</u>	393	<u>320</u>	351

=====									
NIGER					NIAND.	MILO	SANKARANI	TINKIS.	
Année	FARAN.	KOUROUS.	DIALAK.	KOULIK.	BARO	KANKAN	MANDIA.	GOUAL.	TINKIS.

1939	497	333	447	<u>357</u>	609	<u>711</u>	457	371	383
1938	1 012	572	638	<u>388</u>	946	<u>648</u>	447	376	446
1937	805	432	563	<u>343</u>	824	718	464	383	399
1936	683	394	563	<u>449</u>	785	732	482	409	378
1935	777	407	444	<u>385</u>	501	587	396	338	387
1934	889	525	541	<u>390</u>	670	666	438	351	412
1933	923	522	656	<u>432</u>	932	957	574	461	405
1932	947	597	672	<u>469</u>	866	843	547	446	442
1931	747	412	544	<u>460</u>	743	782	504	424	393
1930	727	512	631	<u>534</u>	804	788	464	386	466
1929	767	496	596	<u>547</u>	724	767	532	441	445
1928	836	527	606	<u>569</u>	927	855	522	443	440
1927	798	534	634	<u>512</u>	559	713	514	427	507
1926	777	425	509	<u>454</u>	708	729	496	402	383
1925	997	566	681	<u>617</u>	770	869	557	442	378
1924	678	432	616	<u>577</u>	759	746	528	429	525
1923	914	<u>475</u>	556	<u>408</u>	842	746	460	372	402
1922	550	385	463	<u>383</u>	574	662	370	340	424
1921	327	270	333	<u>275</u>	413	557	270	216	392
1920	433	324	394	<u>326</u>	489	607	317	258	407
1919	528	373	450	<u>372</u>	558	652	360	295	421
1918	635	430	513	<u>424</u>	636	702	408	338	437
1917	546	383	461	<u>381</u>	571	661	368	301	424
1916	515	367	442	<u>366</u>	549	646	354	290	419
1915	503	360	436	<u>360</u>	540	640	349	285	418

NIGER					NIAND.	MILO	SANKARANI	TINKIS.	
Année	FARAN.	KOUROUS.	DIALAK.	KOULIK.	BARO	KANKAN.	MANDIA.	GOUAL.	TINKIS.
1914.	265	238	298	<u>246</u>	369	530	243	192	384
1913.	217	213	267	<u>221</u>	<u>459</u>	505	220	171	376
1912.	475	344	416	<u>344</u>	516	625	333	272	412
1911.	625	424	507	<u>419</u>	629	697	404	334	436
1910.	454	335	407	<u>336</u>	504	617	326	266	410
1909.	817	523	619	<u>512</u>	767	788	490	410	463
1908.	422	319	388	<u>321</u>	482	602	312	254	406
1907.	379	296	363	<u>300</u>	450	582	293	236	400

TABLEAU V

BASSIN DU BANI

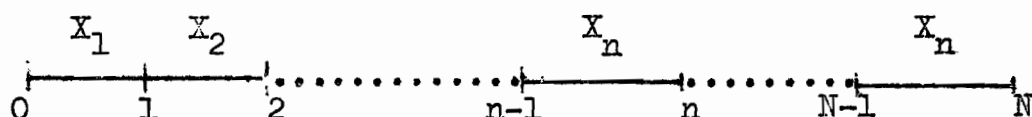
Lames d'eau écoulées annuelles
pour chaque bassin versant partiel

=====							
: Année :	: BAOULE :		: BAGOE :		: BANI :		
:	: BOUGOUNI :		: DIOILA :		: PANKOUROU :		: DOUNA :
:	: BEN .KEGNY :		: SOFARA :		: :		
:	:	:	:	:	:	:	:
: 1957 :	<u>417</u>	: <u>269</u> :	<u>353</u>	: <u>251</u> :	<u>229</u>	: <u>141</u> :	
: 1956 :	<u>213</u>	: <u>155</u> :	<u>202</u>	: <u>177</u> :	<u>152</u>	: <u>116</u> :	
: 1955 :	<u>242</u>	: <u>257</u> :	<u>306</u>	: <u>272</u> :	<u>248</u>	: <u>158</u> :	
:	:	:	:	:	:	:	:
: 1954 :	<u>407</u>	: <u>292</u> :	<u>378</u>	: <u>284</u> :	<u>249</u>	: <u>153</u> :	
: 1953 :	<u>387</u>	: <u>278</u> :	<u>358</u>	: <u>262</u> :	<u>255</u>	: <u>148</u> :	
: 1952 :	<u>281</u>	: <u>252</u> :	<u>309</u>	: <u>257</u> :	<u>187</u>	: <u>144</u> :	
: 1951 :	<u>354</u>	: <u>263</u> :	<u>395</u>	: <u>249</u> :	<u>264</u>	: <u>156</u> :	
: 1950 :	<u>274</u>	: <u>264</u> :	<u>381</u>	: <u>224</u> :	<u>255</u>	: <u>156</u> :	
:	:	:	:	:	:	:	:
: 1949 :	<u>293</u>	: <u>212</u> :	<u>225</u>	: <u>192</u> :	<u>166</u>	: <u>116</u> :	
: 1948 :	<u>252</u>	: <u>188</u> :	<u>246</u>	: <u>183</u> :	<u>155</u>	: <u>113</u> :	
: 1947 :	<u>167</u>	: <u>162</u> :	<u>162</u>	: <u>139</u> :	<u>119</u>	: <u>99</u> :	
: 1946 :	<u>312</u>	: <u>218</u> :	<u>264</u>	: <u>204</u> :	<u>182</u>	: <u>125</u> :	
: 1945 :	<u>336</u>	: <u>229</u> :	<u>270</u>	: <u>204</u> :	<u>178</u>	: <u>124</u> :	
:	:	:	:	:	:	:	:
: 1944 :	<u>167</u>	: <u>152</u> :	<u>185</u>	: <u>155</u> :	<u>133</u>	: <u>108</u> :	
: 1943 :	<u>218</u>	: <u>198</u> :	<u>197</u>	: <u>188</u> :	<u>169</u>	: <u>122</u> :	
: 1942 :	<u>208</u>	: <u>208</u> :	<u>202</u>	: <u>183</u> :	<u>160</u>	: <u>118</u> :	
: 1941 :	<u>271</u>	: <u>229</u> :	<u>265</u>	: <u>188</u> :	<u>166</u>	: <u>118</u> :	
: 1940 :	<u>179</u>	: <u>165</u> :	<u>148</u>	: <u>142</u> :	<u>112</u>	: <u>99</u> :	
:	:	:	:	:	:	:	:

	BAOULE		BAGOE	BANI		
Année	BOUGOUNI	DIOILA	PANKOUROU	DOUNA	BEN.KEGNY	SOFARA
1939	278	218	295	224	202	134
1938	252	215	248	206	191	122
1937	278	217	281	206	178	126
1936	281	235	246	217	194	130
1935	211	228	276	224	196	128
1934	179	143	216	154	128	104
1933	329	243	364	253	232	146
1932	324	229	274	201	173	121
1931	339	266	350	266	237	145
1930	242	189	237	182	148	115
1929	375	262	378	262	235	145
1928	334	255	288	230	203	132
1927	293	247	318	253	228	144
1926	276	204	264	191	166	114
1925	276	204	306	214	191	129
1924	334	264	302	259	232	145
1923	238	188	276	194	171	122
1922	228	167	213	209	185	124
1921	(110)	(105)	117	169	150	104
1920	160	127	162	188	167	113
1919	215	159	203	204	181	122
1918	277	195	249	224	198	130
1917	226	165	211	208	184	123
1916	208	155	198	205	180	121
1915	200	142	192	200	178	120

	BAOULE	BAGOE	BANI			
Année:	BOUGOUNI:	DIOILA:	PANKOUROU:	DOUNA: BEN .KEGNY: SOFARA:		
1914:	(90)	(90)	91	158	141	99
1913:	(55)	(65)	68	149	133	94
1912:	181	140	178	194	173	117
1911:	271	192	245	222	197	130
1910:	170	134	171	191	170	115
1909:	382	257	328	256	226	147
1908:	154	123	158	186	165	112
1907:	128	109	139	178	158	109

quences au dépassement et les fréquences au non dépassement. Son emploi est justifié par la remarque suivante : Un échantillon de grandeur N peut être représenté sur un graphique unidimensionnel par N intervalles égaux dont les bornes sont numérotées de 0 à N :



La valeur X_n , de rang n , est ainsi représentée par le segment $(n - 1, n)$. Si l'échantillonnage est supposé parfaitement représentatif de la population mère des lames d'eau dont il est tiré, tout ce qu'on peut dire de la probabilité pour que X_n soit égale ou dépassée, c'est qu'elle est comprise entre $\frac{n}{N}$ et $\frac{n-1}{N}$; ou, autrement dit, lorsque la taille de l'échantillon croît indéfiniment, si on continue à le représenter par un segment de longueur invariable $(0 - N)$, la position de l'élément de valeur primitive X_n au cours des accroissements successifs se déplacera de façon aléatoire sur le segment $(n - 1, n)$ avec une même probabilité a priori d'occuper une place quelconque sur ce segment. Il n'est donc pas absurde d'admettre comme fréquence la plus probable le milieu de cet intervalle. Remarquons également que l'estimation directe des paramètres d'ajustement des différentes lois de probabilité, conduit à adopter le même point de vue.

On trouvera sur le tableau VI (NIGER Supérieur) et le tableau VII (BANI), les lames d'eau classées avec leurs fréquences expérimentales.

L'expérience nous a montré que les modules ou lames d'eau des cours d'eau à régime tropical ou tropical de transition sont sensiblement distribués suivant la loi normale des écarts (loi de GAUSS). Cette constatation se confirme pour le NIGER Supérieur et ses affluents. La loi de distribution statistique est alors entièrement définie par deux paramètres : la moyenne et l'écart-type.

On montre aisément que l'on obtient une estimation absolument correcte de la moyenne \bar{H} en faisant la moyenne arithmétique des lames d'eau observées ou calculées $\bar{H} = \frac{1}{N} \sum H_i$.

TABLEAU VI

BASSIN DU NIGER SUPERIEUR

Lames d'eau classées

	NIGER				NIAN.	MILO	SANKARANI		TINKIS.
Fréquence	FARAN.	KOUROU.	DIALA.	KOULI.	BARO.	KANKAN.	MANDIA.	GOUAL.	TINKIS.
0,00980	1 233	632	<u>697</u>	<u>617</u>	946	957	574	<u>470</u>	525
0,02941	1 110	<u>628</u>	681	<u>577</u>	932	<u>902</u>	<u>560</u>	461	507
0,04902	1 090	597	672	<u>569</u>	927	869	557	457	503
0,06863	1 012	572	<u>657</u>	<u>548</u>	<u>898</u>	<u>867</u>	547	446	<u>482</u>
0,08824	997	<u>570</u>	656	<u>547</u>	866	855	537	443	482
0,10784	947	566	656	<u>543</u>	<u>865</u>	<u>849</u>	537	442	475
0,12745	923	<u>549</u>	638	<u>542</u>	842	843	532	441	466
0,14706	914	534	<u>636</u>	<u>541</u>	824	788	528	441	464
0,16667	<u>895</u>	527	634	<u>534</u>	<u>810</u>	788	522	429	463
0,18627	889	525	<u>631</u>	<u>515</u>	804	782	514	427	<u>462</u>
0,20588	<u>865</u>	523	631	<u>512</u>	<u>793</u>	767	504	424	449
0,22549	836	522	619	<u>512</u>	785	746	<u>503</u>	<u>419</u>	446
0,24510	826	512	616	<u>469</u>	<u>785</u>	746	502	414	445
0,26471	817	496	613	<u>460</u>	770	732	496	<u>414</u>	442
0,28431	805	491	606	<u>454</u>	767	729	496	410	440
0,30392	798	<u>485</u>	596	<u>449</u>	759	<u>721</u>	<u>490</u>	409	437
0,32353	796	<u>475</u>	563	<u>441</u>	743	718	490	407	436
0,34314	777	<u>475</u>	563	<u>432</u>	724	<u>714</u>	486	402	424
0,36275	777	432	559	<u>432</u>	708	713	482	401	424
0,38235	767	432	556	<u>424</u>	<u>687</u>	<u>711</u>	482	392	424

	NIGER				NIAN.	MILO	SANKARANI		TINKIS.
Fréquence	FARAN.	KOUROU.	DIALA.	KOULI.	BARO.	KANKAN.	MANDIA.	GOUAL.	TINKIS.
0,40196	757	430	544	<u>419</u>	678	711	479	392	422
0,42157	747	425	541	<u>408</u>	670	702	479	386	<u>421</u>
0,44118	727	424	538	<u>400</u>	<u>650</u>	<u>701</u>	467	383	421
0,46078	717	<u>420</u>	<u>517</u>	<u>394</u>	639	697	467	378	419
0,48039	697	412	513	<u>390</u>	636	678	464	376	419
0,50000	683	407	513	<u>388</u>	632	668	464	375	418
0,51961	678	407	511	<u>385</u>	632	666	460	372	412
0,53922	678	<u>405</u>	509	<u>383</u>	629	662	457	371	412
0,55882	673	394	507	<u>381</u>	616	661	454	371	410
0,57843	669	<u>390</u>	481	<u>372</u>	609	<u>654</u>	447	352	407
0,59804	644	386	<u>467</u>	<u>371</u>	582	<u>654</u>	438	351	406
0,61765	635	385	463	<u>368</u>	581	652	409	350	405
0,63725	625	383	461	<u>366</u>	574	<u>648</u>	408	340	402
0,65686	580	373	450	<u>360</u>	571	646	404	338	400
0,67647	550	<u>370</u>	450	<u>357</u>	559	640	396	338	399
0,69608	546	367	447	<u>344</u>	558	<u>638</u>	393	334	393
0,71569	528	360	444	<u>343</u>	<u>550</u>	625	382	332	393
0,73529	<u>526</u>	344	444	<u>338</u>	549	<u>618</u>	370	320	392
0,75490	515	342	442	<u>336</u>	540	617	368	301	389
0,77451	503	335	436	<u>326</u>	516	<u>615</u>	360	295	387
0,79412	497	333	434	<u>326</u>	504	<u>609</u>	<u>359</u>	<u>294</u>	385
0,81373	475	<u>332</u>	431	<u>325</u>	501	<u>609</u>	354	290	385
0,83333	454	<u>325</u>	431	<u>321</u>	<u>500</u>	607	349	285	384
0,85294	433	324	416	<u>313</u>	<u>494</u>	602	333	272	383
0,87255	422	319	407	<u>311</u>	489	587	326	266	383

	NIGER				NIAN	MILO	SANKARANI	TINKIS	
Fréquence	FARAN	KOUROU	DIALA	KOULI	BARO	KANKAN	MANDIA	GOUAL	TINKIS
0,89216	414	316	394	<u>300</u>	482	582	317	258	378
0,91176	384	<u>315</u>	388	<u>275</u>	<u>459</u>	557	312	254	378
0,93137	379	296	363	<u>265</u>	<u>459</u>	<u>542</u>	293	236	376
0,95098	327	270	333	<u>263</u>	450	530	270	216	351
0,97059	265	238	298	<u>246</u>	413	505	243	192	346
0,99020	217	213	267	<u>221</u>	369	<u>494</u>	220	171	329

TABLEAU VII

BASSIN DU BANI

Lames d'eau classées

	BAOULE		BAGOE		BANI		
Fréquence:	BOUGOUNI	DIOILA	PANKOUROU	DOUNA	BEN	KEGNY	SOFARA
0,00980	<u>417</u>	<u>292</u>	<u>395</u>	<u>284</u>	264		<u>158</u>
0,02941	407	<u>278</u>	381	<u>272</u>	255		156
0,04902	387	<u>269</u>	378	266	<u>255</u>		156
0,06863	382	266	378	<u>262</u>	<u>249</u>		<u>153</u>
0,08824	375	264	364	262	<u>248</u>		<u>148</u>
0,10784	354	264	358	259	237		147
0,12745	339	263	<u>353</u>	<u>257</u>	235		146
0,14706	336	262	350	256	232		145
0,16667	334	257	328	253	232		145
0,18627	334	<u>257</u>	318	253	<u>229</u>		145
0,20588	329	255	309	<u>251</u>	228		<u>144</u>
0,22549	324	252	306	<u>249</u>	226		144
0,24510	312	247	306	230	203		<u>141</u>
0,26471	293	243	302	224	202		134
0,28431	293	235	295	<u>224</u>	198		132
0,30392	281	229	288	224	197		130
0,32353	281	229	281	224	196		130
0,34314	278	229	276	222	194		130
0,36275	278	228	276	217	191		129
0,38235	277	218	274	214	191		128

	BAOULE		BAGOE	BANI		
Fréquence	BOUGOUNI	DIOILA	PANKOUROU	DOUNA	BEN .KEGNY	SOFARA
0,40196	276	218	270	209	187	126
0,42157	276	217	265	208	185	125
0,44118	274	215	264	206	184	124
0,46078	271	212	264	206	182	124
0,48039	271	208	249	205	181	123
0,50000	252	204	248	204	180	122
0,51961	252	204	246	204	178	122
0,53922	242	198	246	204	178	122
0,55882	242	195	245	201	178	122
0,57843	238	192	237	200	173	121
0,59804	228	189	225	194	173	121
0,61765	226	188	216	194	171	120
0,63725	218	188	213	192	170	118
0,65686	215	167	211	191	169	118
0,67647	<u>213</u>	165	203	191	167	117
0,69608	211	165	<u>202</u>	188	166	<u>116</u>
0,71569	208	162	202	188	166	116
0,73529	208	159	198	188	166	115
0,75490	200	<u>155</u>	197	186	165	115
0,77451	181	155	192	183	160	114
0,79412	179	152	185	183	158	113
0,81373	179	143	178	182	155	113
0,83333	170	142	171	178	<u>152</u>	112
0,85294	167	140	162	<u>177</u>	150	109
0,87255	167	134	162	169	148	108

	BAOULE		BAGOE		BANI	
Fréquence	BOUGOUNI	DIOILA	PANKOUROU	DOUNA	BEN .KEGNY	SOFARA
0,89216	160	127	158	158	141	104
0,91176	154	123	148	155	133	104
0,93137	128	109	139	154	133	99
0,95098	110	105	117	149	128	99
0,97059	90	90	91	142	119	99
0,99020	55	65	68	139	112	94

L'écart-type σ se calcule à partir de la variance σ^2 dont une estimation absolument correcte est donnée par l'expression $\frac{1}{N-1} \sum (H_i - \bar{H})^2$.

La loi de probabilité étant établie, les différentes valeurs particulières se calculent à partir de la table de l'intégrale de GAUSS en introduisant la variable réduite

$$x = \frac{H - \bar{H}}{\sigma}$$

Nous rappelons pour mémoire que la probabilité de non dépassement pour une valeur X de cette variable réduite correspondant à une lame d'eau donnée, est exprimée, dans le cas de la loi de GAUSS, par l'intégrale :

$$P_r (x \leq X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Les résultats des calculs d'estimation, pour chacune des 15 stations, figurent dans le tableau VIII. Nous donnons également dans ce tableau les valeurs correspondant aux fréquences décennale, cinquanteaire et centenaire.

La distribution statistique des lames d'eau, ainsi que les courbes ajustées de la loi de GAUSS figurent sur les graphiques 5 et 6 pour le bassin du NIGER Supérieur et sur les graphiques 7 et 8 pour le bassin du BANI. Les abscisses de ces graphiques sont à échelle gaussique : elles indiquent les fréquences de dépassement. Avec une telle représentation, les courbes sont des droites. Leur pente et leur position sur le graphique ont une signification physique dont nous parlerons au chapitre traitant de l'irrégularité interannuelle.

TABLEAU VIII

BASSIN DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Etude statistique des lames d'eau

(Valeurs centrales)

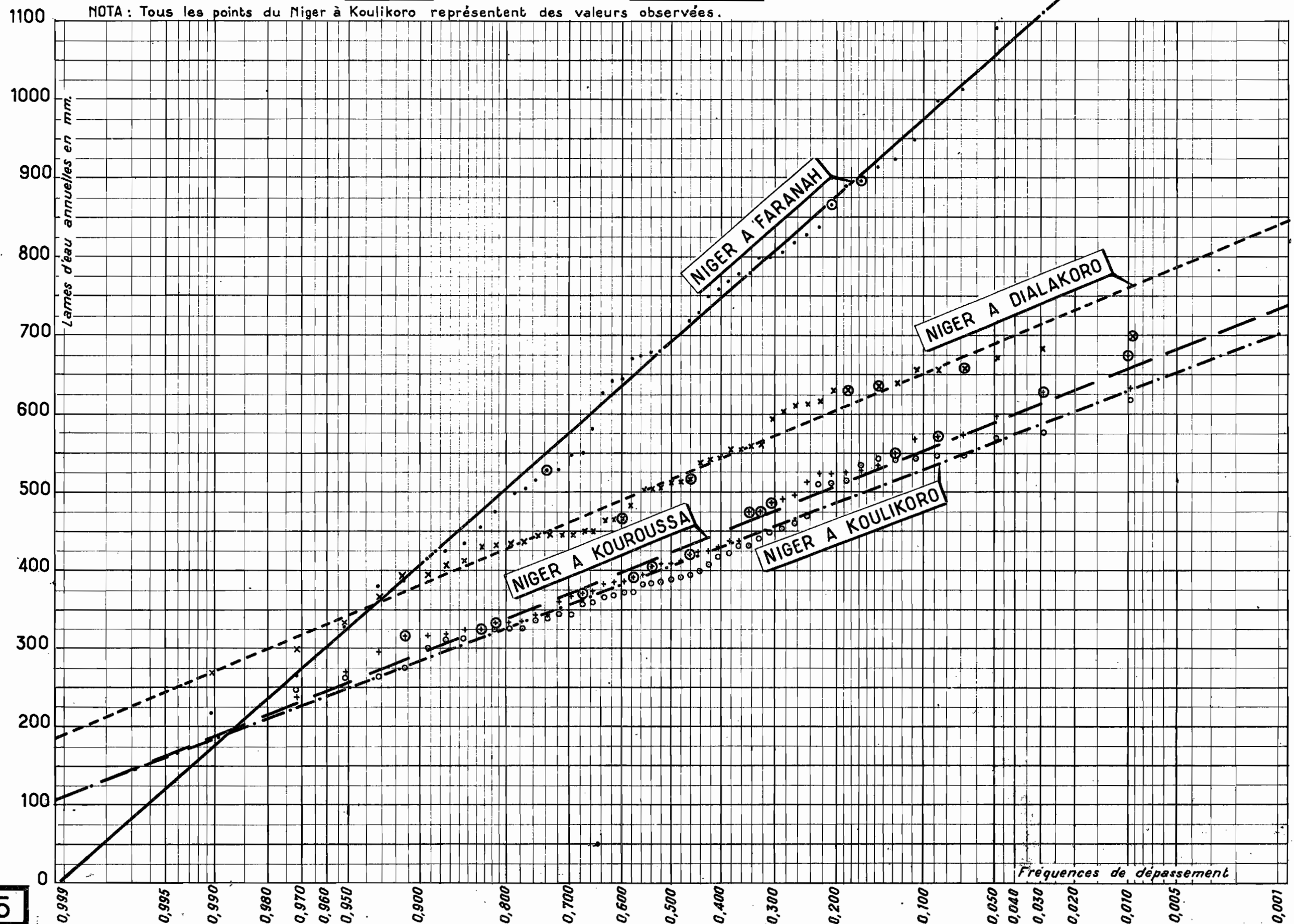
Rivière	Station	Station : B.V. Km ²	H : mm	H : mm	H : mm	H : mm	H : mm
			décennal	cinquanten.	centenair		
NIGER	FARANAH	3.180	687	223,4	973	1.146	1.206
NIGER	KOUROUSSA	18.000	423	100,5	552	629	656
NIGER	DIALAKORO	71.000	516	105,2	650	732	760
NIGER	KOULIKORO	120.000	406	96,3	529	604	629
NIANDAN	BARO	12.600	653	149,4	844	960	1.000
MILO	KANKAN	9.900	690	102,6	821	901	928
SANKARANI	MANDIANA	21.900	437	87,5	549	617	640
SANKARANI	GOUALA	35.300	360	73,4	454	511	530
TINKISSO	TINKISSO	6.400	420	41,0	473	504	515
BAOULE	BOUGOUNI	15.700	252	81,7	356	420	442
BAOULE	DIOILA	32.500	198	54,5	268	310	325
BAGOE	PANKOUROU	31.800	249	78,2	349	410	430
BANI	DOUNA	101.600	208	36,1	254	282	292
BANI	BEN.KEGNY	116.000	186	37,3	234	263	273
BANI	SOFARA	129.400	125	16,3	145	158	163

BASSIN DU NIGER SUPÉRIEUR — COURS PRINCIPAL
Distribution statistique des lames d'eau écoulées annuelles

Gr. 5

Points cerclés : valeurs observées — Points non cerclés : valeurs calculées

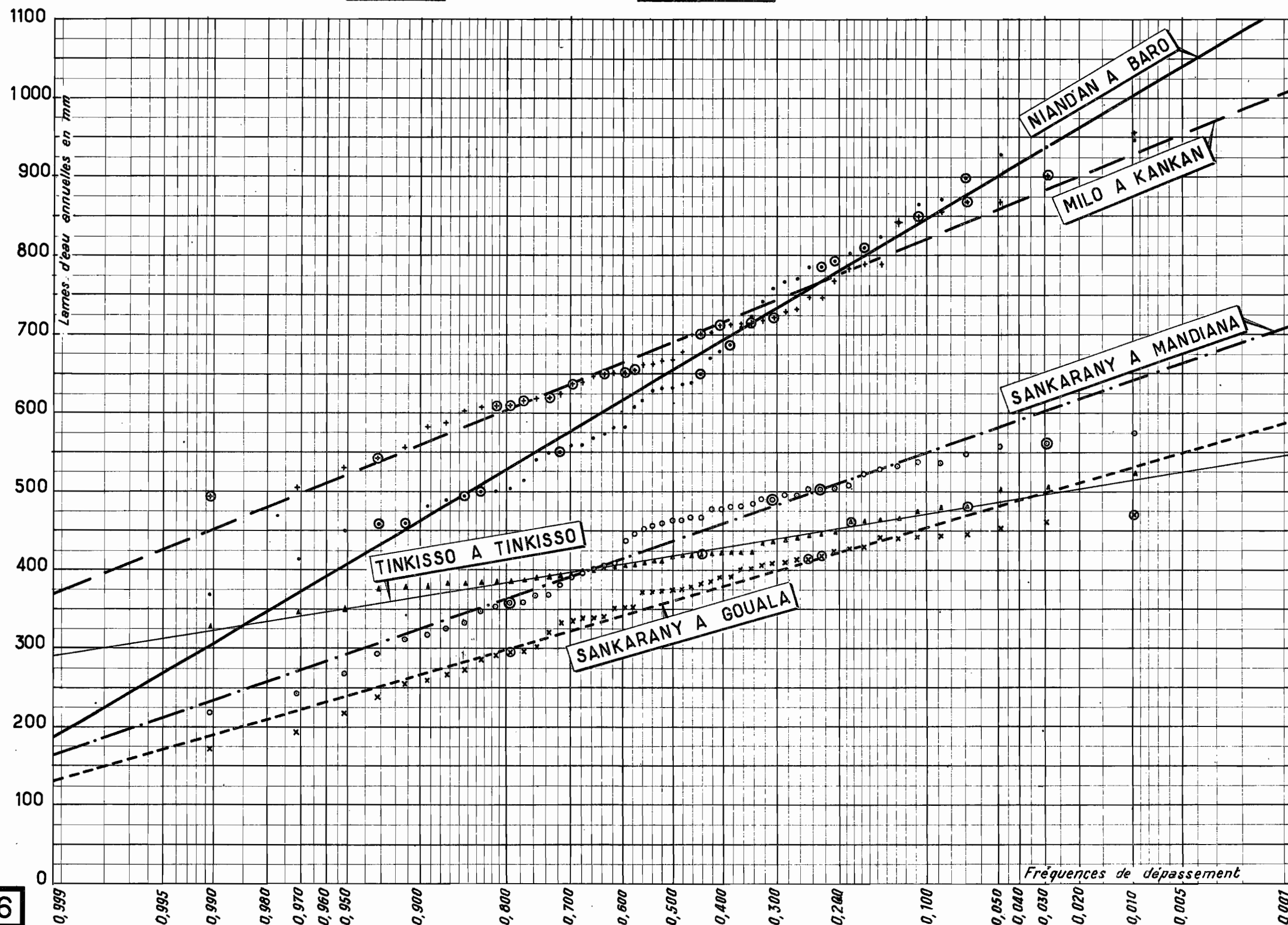
NOTA : Tous les points du Niger à Koulikoro représentent des valeurs observées.



NIG. 8275

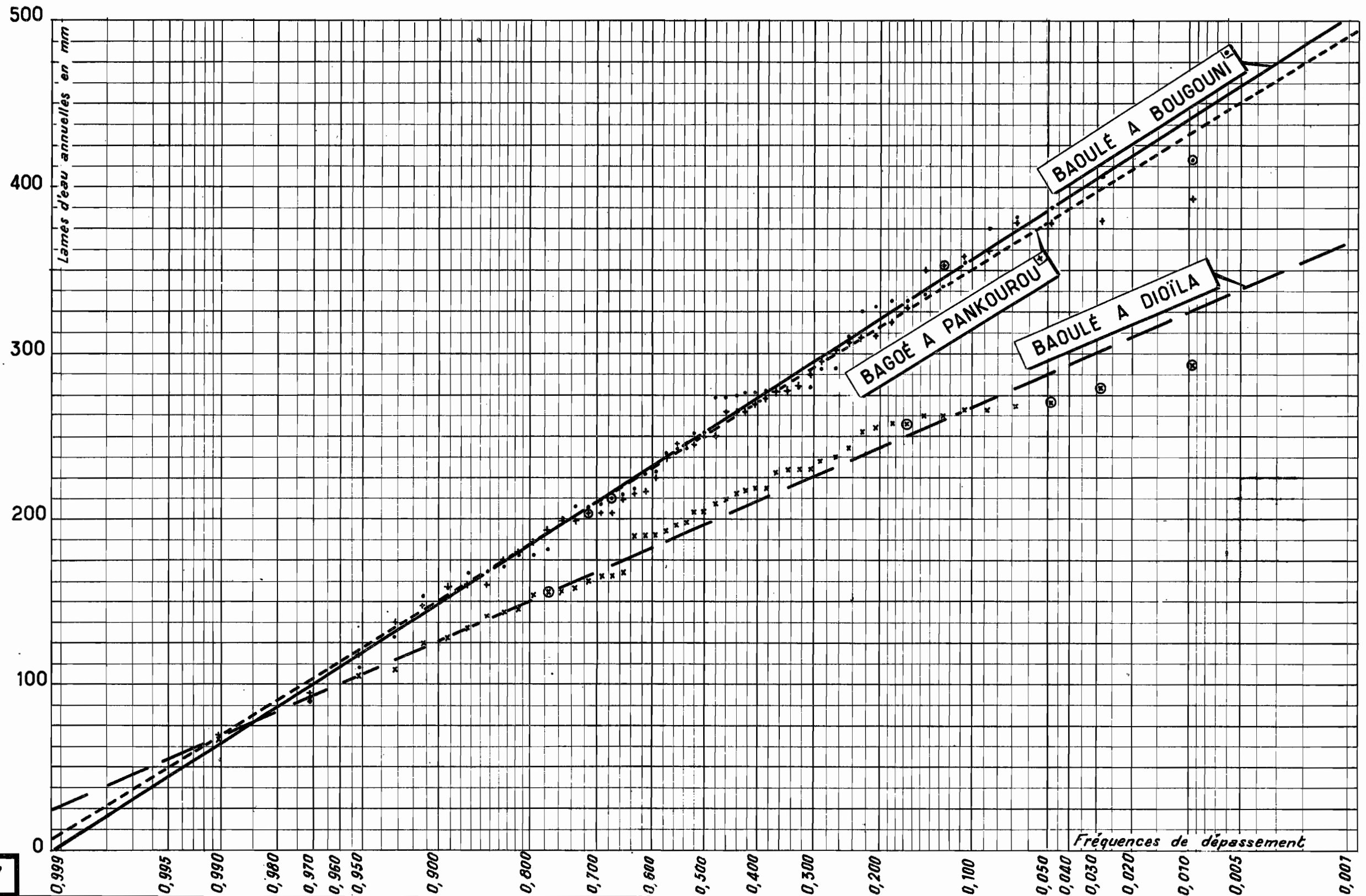
Distribution statistique des lames d'eau écoulées annuelles

Points cerclés : Valeurs observées _ Points non cerclés : Valeurs calculées



Distribution statistique des lames d'eau écoulées annuelles

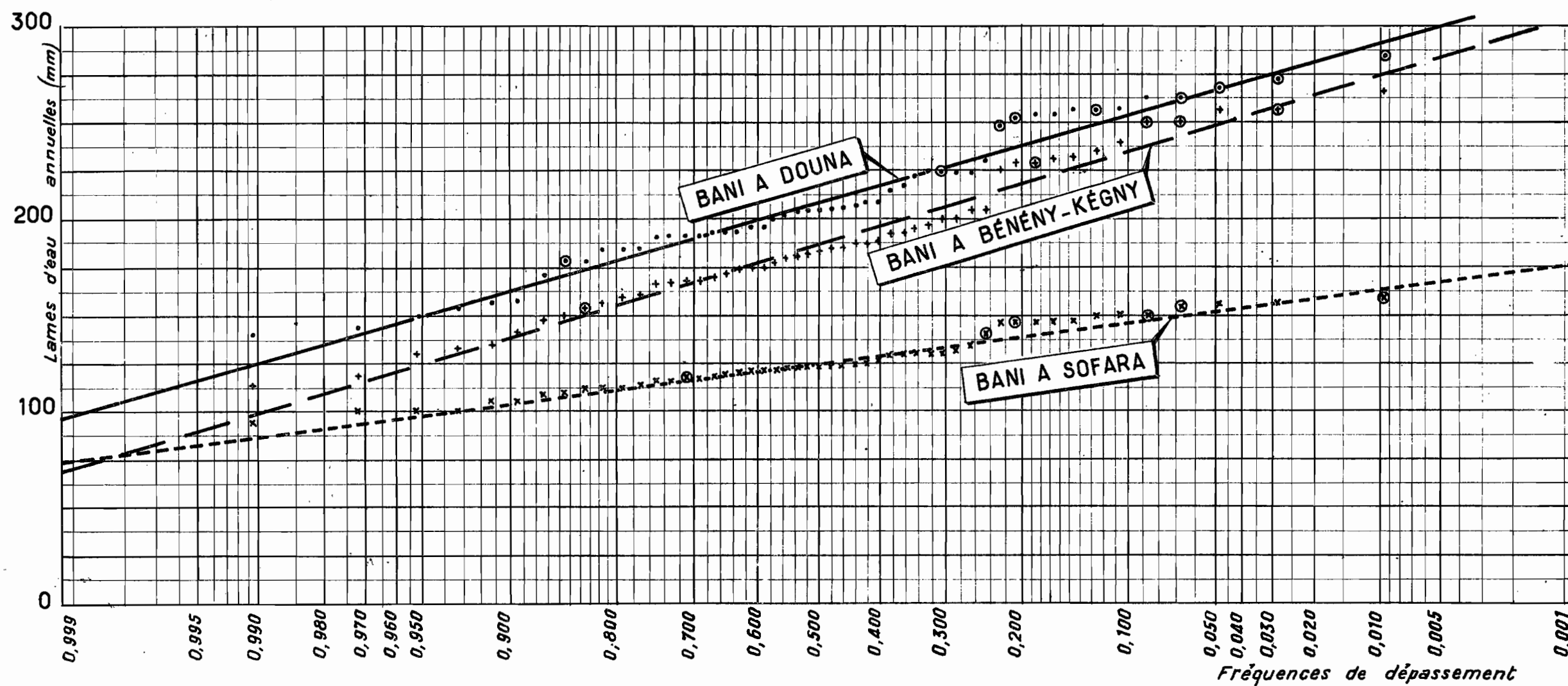
Points cerclés : Valeurs observées - Points non cerclés : Valeurs calculées



BASSIN DU BANI - COURS PRINCIPAL

Distribution statistique des lames d'eau écoulées annuelles

Points cerclés : Valeur observées — Points non cerclés : Valeurs calculées



Nous rappelons que les modules sont obtenus, en m^3/s , en multipliant les lames d'eau, en mm, par le rapport :

$$\frac{1.000 S}{31,6 \times 10^6}$$

S étant la superficie du bassin correspondant exprimée en km^2 .

Nous donnons ci-dessous les modules moyens correspondant aux différentes stations étudiées, ainsi que, entre parenthèses, les débits moyens pendant les périodes d'observations.

Bassin du NIGER

NIGER à FARANAH	69 m^3/s	(76 m^3/s)
NIGER à KOUROUSSA	241 m^3/s	(250 m^3/s)
NIGER à DIALAKORO	1.160 m^3/s	(1.350 m^3/s)
<u>NIGER à KOULIKORO</u> (station de référence)	1.545 m^3/s	(1.545 m^3/s)
NIANDAN à BARO	261 m^3/s	(267 m^3/s)
MILO à KANKAN	216 m^3/s	(214 m^3/s)
SANKARANI à MANDIANA	303 m^3/s	(332 m^3/s)
SANKARANI à GOUALA	402 m^3/s	(447 m^3/s)
TINKISSO à TINKISSO	85 m^3/s	(92 m^3/s)

Bassin du BANI

BAOULE à BOUGOUNI	125 m^3/s	(157 m^3/s)
BAOULE à DIOILA	204 m^3/s	(257 m^3/s)
BAGOE à PANKOUROU	250 m^3/s	(280 m^3/s)
BANI à DOUNA	668 m^3/s	(794 m^3/s)
BANI à BENENY-KEGNY	682 m^3/s	(825 m^3/s)
BANI à SOFARA	512 m^3/s	(586 m^3/s)

Ce tableau met en relief l'intérêt des méthodes de corrélation. Les stations en service depuis peu d'années fournissent des résultats d'observation beaucoup trop élevés, dus à la forte hydraulité de la période. La différence s'atténue pour les stations observées depuis longtemps (NIGER à KOUROUSSA, NIANDAN à BARO, MILO à KANKAN) : elle est pratiquement insignifiante pour cette dernière station.

V - DETERMINATION DES MODULES EN UN POINT QUELCONQUE DU BASSIN

Si nous nous plaçons au confluent de deux cours d'eau, les débits moyens annuels de chacun d'eux peuvent être représentés respectivement par les variables aléatoires X et Y. Ces modules suivant les lois de Gauss, leur distribution statistique est entièrement définie par les valeurs :

\bar{X} , \bar{Y} moyennes

σ_x , σ_y écarts types

Le module de l'ensemble, c'est-à-dire après le confluent, pour une année donnée, est une variable aléatoire $Z = X + Y$ définie également en statistique par sa valeur moyenne \bar{Z} et son écart type σ_z . On sait en effet qu'elle suit aussi une loi de GAUSS.

Quel que soit le degré de liaison entre X et Y, on a toujours $\bar{Z} = \bar{X} + \bar{Y}$. D'autre part, la variance de Z répond à l'équation :

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2 \frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})$$

Si les variables X et Y sont indépendantes, $\sum (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})$ est nul. On a donc :

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

Si les variables X et Y sont totalement dépendantes, le coefficient de corrélation est égal à l'unité et l'on a :

$$\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X}) (y_i - \bar{Y}) = \sigma_x \sigma_y$$

d'où :

$$\sigma_z = \sigma_x + \sigma_y$$

Dans les cas intermédiaires, il faudrait calculer le terme $\frac{1}{2n} \sum (x_i - \bar{X}) (y_i - \bar{Y})$. Ce calcul ne présente aucune difficulté, mais il est très long. Pour le bassin du NIGER, on peut admettre que le coefficient de corrélation est suffisamment voisin de l'unité pour que σ_z soit estimé d'après l'équation

$$\sigma_z = \sigma_x + \sigma_y.$$

Cette hypothèse est justifiée par l'homogénéité du climat sur l'ensemble des bassins, corroborée par le fait qu'il a été possible d'établir une corrélation entre les débits d'un bassin quelconque et ceux du NIGER à KOULIKORO. La corrélation, assez lâche dans le cas précédent, est évidemment beaucoup plus serrée si l'on se place sur deux cours d'eau à l'amont d'un confluent, les bassins d'alimentation étant alors nécessairement voisins. Pour cette monographie, nous avons dû limiter le volume des calculs et renoncer à l'établissement des coefficients de corrélation.

En passant aux lames d'eau et appelant S_x et S_y , les surfaces respectives des bassins alimentant les deux cours d'eau, on obtient :

$$\bar{H}_z = \frac{1}{S_x + S_y} (S_x \bar{H}_x + S_y \bar{H}_y)$$

$$\text{et } \sigma_z = \frac{1}{S_x + S_y} (S_x \sigma_x + S_y \sigma_y)$$

A partir de ces deux relations, nous avons établi le graphique 9 qui donne les variations de \bar{H} en fonction de la surface du bassin pour les cours d'eau étudiés et le graphique 10 donnant la variation de σ . L'échelle des surfaces a été prise logarithmique pour faciliter la représentation.

Nous allons montrer sur un exemple tiré du graphique 9 le mode opératoire.

Sur les courbes de variations des lames d'eau du NIGER Supérieur à l'amont de KOUROUSSA et du NIANDAN, établies d'après les résultats de l'étude statistique, le confluent du NIGER et du NIANDAN est représenté par le point (a) pour le NIANDAN et le point (a') pour le NIGER à l'amont du confluent.

On a respectivement :

NIANDAN :

Surface du bassin $S_x = 12.700 \text{ km}^2$
Lame d'eau moyenne $\bar{H}_x = 652 \text{ mm}$

NIGER :

Surface du bassin $S_y = 18.700 \text{ km}^2$
Lame d'eau moyenne $\bar{H}_y = 420 \text{ mm}$
Surface totale après le confluent : 31.400 km^2
L'application de la formule donne $\bar{H}_z = 513 \text{ mm}$

On porte alors le point (a") de coordonnées $S = 31.400$ $\bar{H} = 513$, qui représente la lame d'eau moyenne à une station du NIGER située immédiatement en aval du confluent. On procède de même pour tous les affluents jusqu'à KOULIKORO. Le calcul est le même pour la variation de σ .

On a choisi les mêmes symboles pour les points représentatifs correspondants des deux graphiques :

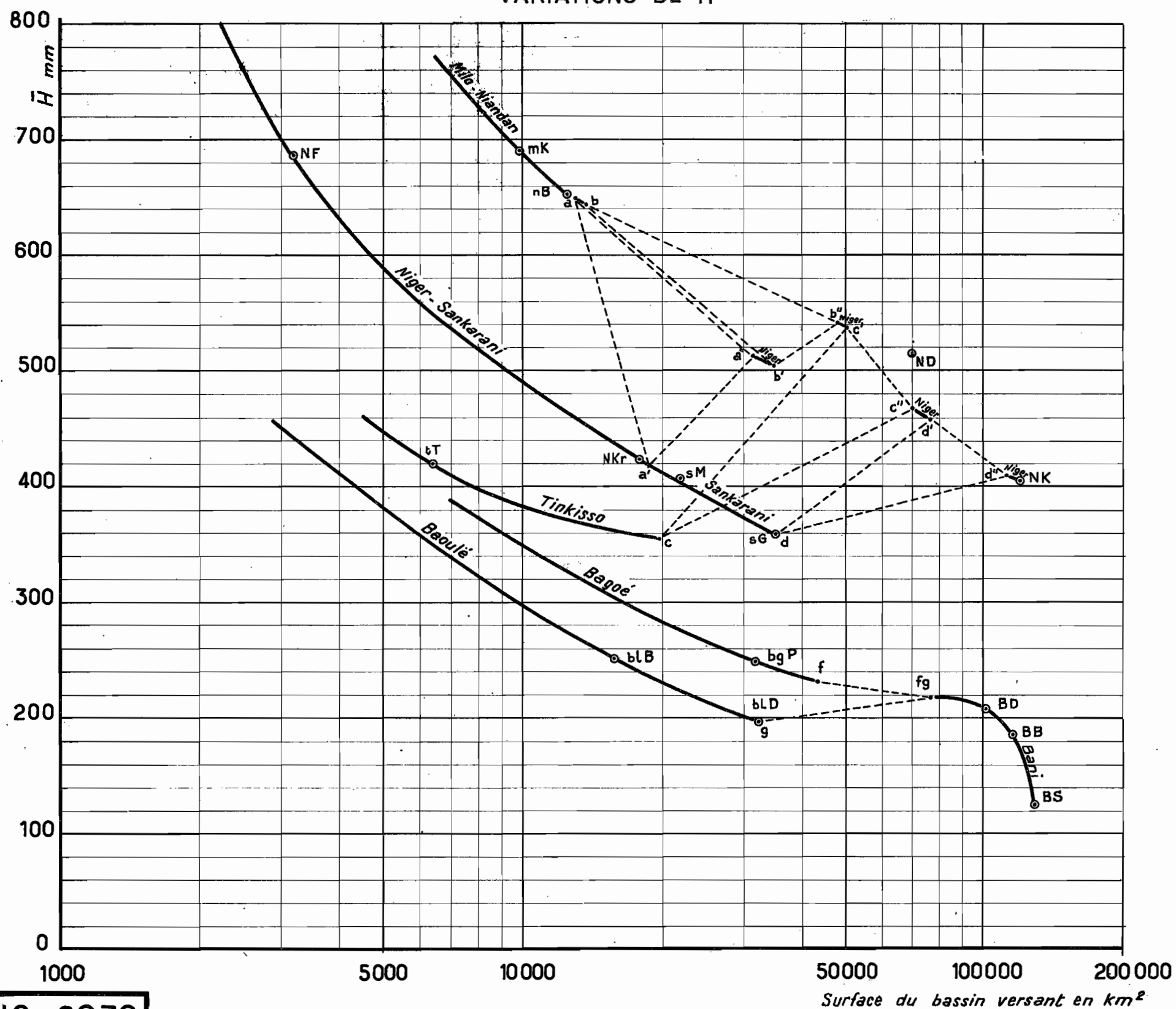
Stations de mesures

N F	:	NIGER à FARANAH
N K _r	:	NIGER à KOUROUSSA
N D	:	NIGER à DIALAKORO
N K	:	NIGER à KOULIKORO
n B	:	NIANDAN à BARO
m K	:	MILO à KANKAN
s M	:	SANKARANI à MANDIANA
s G	:	SANKARANI à GOUALA
t T	:	TINKISSO à TINKISSO
bl B	:	BAOULE à BOUGOUNI
bl D	:	BAOULE à DIOILA
bg P	:	BAGOE à PANKOUROU
B D	:	BANI à DOUNA
B B	:	BANI à BENENY KEGNY
B S	:	BANI à SOFARA

Confluents

a.	:	NIANDAN au confluent NIGER
a'	:	NIGER à l'amont du confluent NIANDAN
a"	:	NIGER à l'aval du confluent NIANDAN
b.	:	MILO au confluent NIGER
b'	:	NIGER à l'amont du confluent MILO
b"	:	NIGER à l'aval du confluent MILO
c.	:	TINKISSO au confluent NIGER
c'	:	NIGER à l'amont du confluent TINKISSO
c"	:	NIGER à l'aval du confluent TINKISSO
d.	:	SANKARANI au confluent NIGER
d'	:	NIGER à l'amont du confluent SANKARANI
d"	:	NIGER à l'aval du confluent SANKARANI
f	:	BAGOE au confluent du BAOULE
g	:	BAOULE au confluent du BAGOE
fg	:	BANI à l'aval du confluent BAOULE-BAGOE

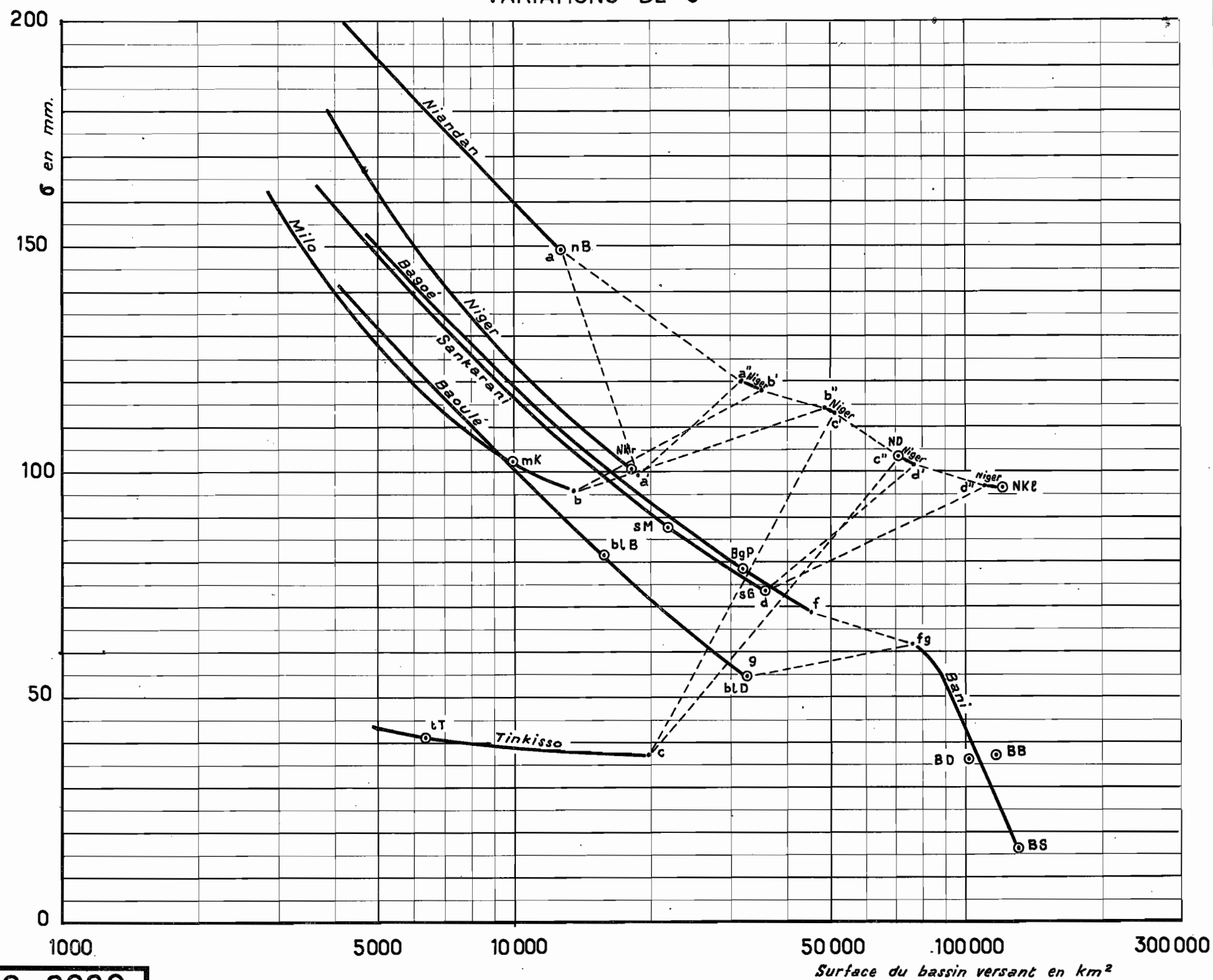
Étude statistique des lames d'eau

VARIATIONS DE \bar{H} 

NIG-8279

A. 27.5 fr.

Étude statistique des lames d'eau

VARIATIONS DE σ 

Les points figuratifs d'un même confluent ont été reliés par des lignes de rappel en trait interrompu.

Pour les lames d'eau moyennes, malgré quatre constructions consécutives, on retombe très exactement sur la valeur trouvée pour KOULIKORO lors de l'étude statistique. Cette "fermeture", pour employer le langage des topographes, est particulièrement éloquente. Elle constitue une vérification très intéressante de la valeur des mesures de débits et des hypothèses qui ont été faites pour les diverses corrélations. Par contre, le point représentatif du NIGER à DIALAKORO (sensiblement c") donne une valeur inférieure de 48 mm à celle que l'on avait obtenue par détermination directe, soit un écart voisin de 9%. Dans le volume I de cette monographie, on avait remarqué un écart entre les débits de SIGUIRI et ceux de DIALAKORO, que l'on avait des raisons de croire plus exacts. Or la prise en considération des débits mesurés à SIGUIRI ramènerait sensiblement le point N D sur la courbe du graphique 9. Un nouvel étalonnage de cette station s'avère indispensable, ainsi que la vérification du calage des échelles.

Le MILO et le NIANDAN, d'une part, le Haut-NIGER et le SANKARANI, d'autre part, semblent avoir la même loi de variation \bar{H} (S). Ces deux derniers cours d'eau reçoivent sensiblement les mêmes précipitations, présentent des couvertures végétales analogues et des caractéristiques hydrographiques voisines. Notons enfin la chute brutale des valeurs de \bar{H} pour le BANI dès son entrée dans la cuvette lacustre, chute parfaitement explicable par les pertes en eau que subit alors cette rivière.

Pour les écarts-types, on observe des écarts plus importants entre les estimations directes et celles qui sont déduites de la présente construction. Ces écarts ont été répartis le long de la courbe et n'excèdent pas 4% à chacun des confluent, ce qui est très acceptable.

L'utilisation de ces diagrammes est très simple. Si l'on cherche les caractéristiques des modules pour une section située en un point quelconque sur l'un des cours d'eau étudiés, il suffira de reporter la surface du bassin correspondant sur les graphiques 9 et 10 pour obtenir immédiatement la valeur moyenne et l'écart type des lames d'eau, d'où ceux des modules. Il faut noter toutefois que les valeurs obtenues n'ont de signification que pour des bassins d'au moins 5.000 km².

Si l'étude de l'aménagement envisagé porte sur une rivière qui ne figure pas dans les graphiques, il faudra alors procéder par analogie, ce qui sera évidemment plus délicat. Il sera bon, dans ce cas, de contrôler les résultats par l'étude pluviométrique du bassin.

L'étude statistique exposée dans ce chapitre se rapporte à la période 1907-1957. La question se pose de savoir si l'échantillonnage utilisé est bien représentatif d'une très longue période : elle sera examinée ultérieurement au chapitre traitant de l'hydraulicité.

Notons enfin que les renseignements fournis ne s'adressent qu'à des bassins d'une certaine dimension. Pour de très petits bassins, de 10 à 50 km², quelques valeurs peuvent être tirées des études sur bassins expérimentaux, mais l'interprétation statistique des résultats est beaucoup plus délicate. L'état actuel des études ne permet pas encore d'avancer des chiffres valables, même de façon approximative.

C H A P I T R E I I

ETIAGES

Les étiages des rivières étudiées dans cette monographie sont connus avec une précision relative très inférieure à celle des modules ou des crues. Cela tient en partie au fait qu'il est plus difficile de mesurer avec précision un débit de basses eaux qu'un débit moyen ou un débit de crue, en raison des vitesses généralement faibles ne permettant pas une bonne utilisation du moulinet. Il faut ajouter les variations du lit des cours d'eau qui, bien que peu importantes pour le NIGER et ses affluents, modifient de façon non négligeable les lois hauteurs-débits pour les basses-eaux et dont il n'est pas toujours possible de tenir compte.

Ces réserves étant faites, il est néanmoins possible de dégager à partir des données d'observation les lois générales régissant les étiages et de présenter des résultats numériques significatifs.

Nous étudierons successivement le tarissement des différents bassins, la répartition statistique des étiages à KOULIKORO, les étiages des autres stations du Haut-NIGER et du BANI. Nous tenterons enfin de tirer des études précédentes un tableau des principales valeurs concernant ces étiages.

I - ETUDE DU TARISSEMENT ET FORMATION DES ETIAGES

Si l'on considère le tarissement comme la vidange de l'ensemble des réserves souterraines du bassin drainé par le cours d'eau, on sait que la loi de tarissement peut se mettre sous la forme

$$q = q_0 e^{-\alpha t}$$

q_0 étant le débit pour une origine des temps arbitraire et q le débit au temps t , généralement exprimé en jours.

Cette hypothèse est justifiée en pratique si la courbe $q(t)$ tracée sur un diagramme à abscisses (t) linéaires et à ordonnées (q) logarithmiques est une droite.

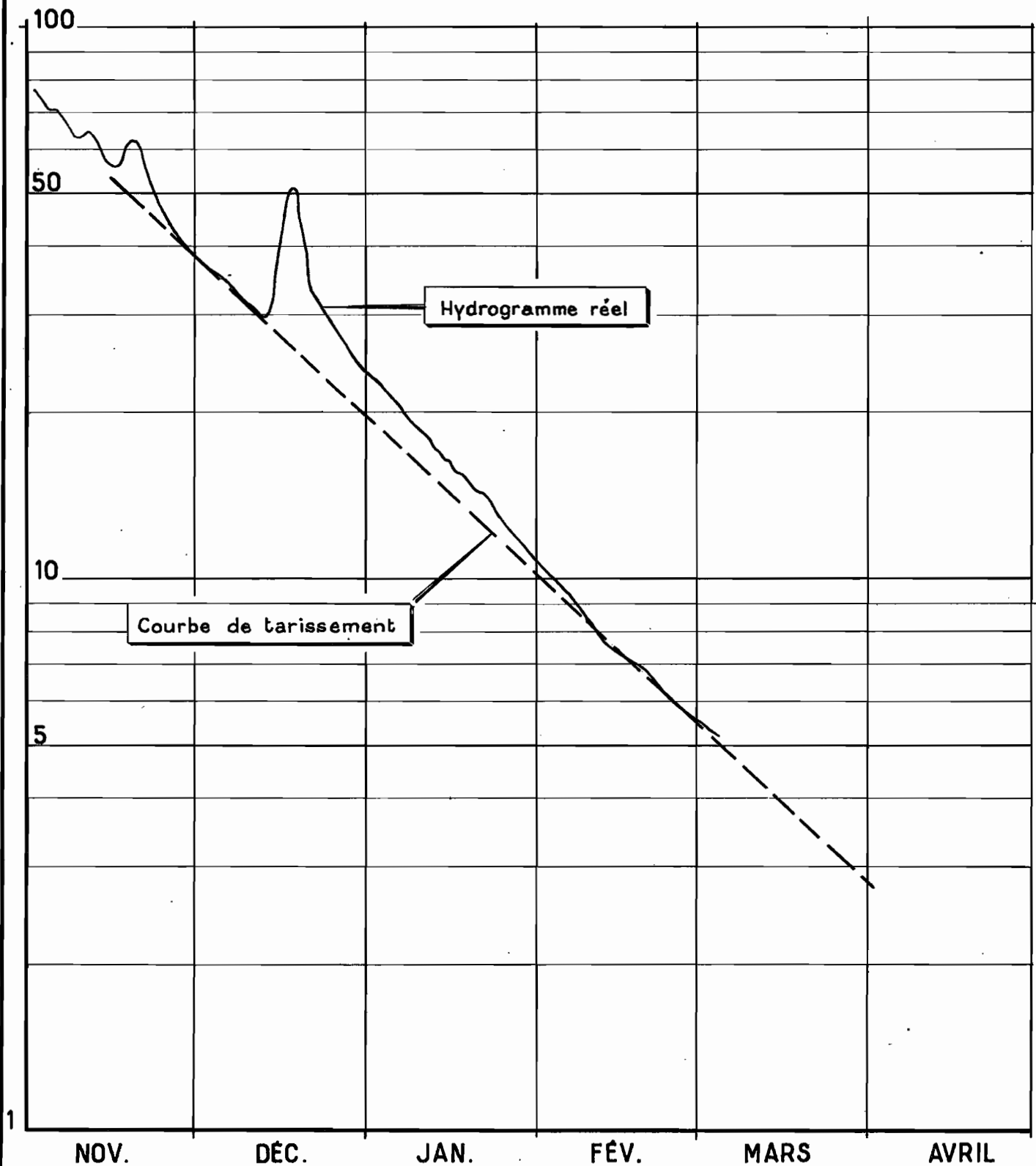
On a donc tracé sur de tels diagrammes toutes les décrues observées aux diverses stations du Haut-NIGER et du BANI. Un premier examen des courbes obtenues montre que le tarissement commence au plus tard début décembre, sauf pour le BANI inférieur (DOUNA, BENENY-KEGNY, SOFARA) où l'on observe un décalage d'un mois (début janvier) dû à la traversée de zones à très faible pente et de zones inondées dont la loi de vidange est différente de celle des réserves souterraines.

Au cours du tarissement, des pluies intéressant une partie du bassin peuvent créer des crues localisées, qui se traduisent par un "accident" généralement peu important sur la courbe $q(t)$. Ces crues n'ont que très rarement une influence sur la vidange générale des réserves et la courbe de tarissement est le plus souvent rejointe au bout d'un temps plus ou moins long, sans qu'il soit observé de décalage. Un exemple, particulièrement net, se rapportant au NIGER à FARANAH, est donné sur le graphique 11.

Les lois de tarissement, définies par la valeur du coefficient α (constante de temps) de la formule citée précédemment, peuvent différer d'une année à l'autre. En effet, suivant la répartition spatiale des pluies dans l'année, les réserves de telle partie du bassin ont pu être favorisées par rapport à celle d'une autre zone. Le fait que les gîtes de ces réserves n'ont pas tous la même constitution géologique, en particulier la même perméabilité, et qu'ils sont plus ou moins éloignés de l'exutoire, peut avoir une influence sur le tarissement général qui n'est autre qu'une somme de tarissements particuliers.

Cependant, nous avons déjà mis l'accent sur l'homogénéité relative de la pluviosité sur les bassins du NIGER Supérieur et du BANI et on peut s'attendre à ce que les différences soient faibles. C'est bien ce

Exemple de tarissement interrompu par une crue tardive



NIG 8281

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED:

LE: Mars 59

DES: Grotard

VISA:

TUBE N°:

AO

qui est observé et il est possible, même aisé, de définir un tarissement moyen caractéristique de chaque bassin. On trouvera les résultats dans le tableau IX.

Pour les stations du NIGER Supérieur lui-même, les résultats sont très homogènes : valeurs de α comprises entre 0,022 et 0,024. On pourrait penser que α doive être plus grand pour des bassins de petite taille. En fait, il n'en est rien et cela se conçoit. Si l'on assimile la vidange d'une réserve souterraine à celle d'un réservoir de section S obturé par un bouchon perméable de section s, l'application de la loi de Darcy $u = K h$ donne comme loi de vidange :

$$- \frac{s K}{S} t$$

$$q = q_0 e$$

$\frac{s}{S}$ représente, dans le cas d'un bassin, le rapport de la section de percolation de la réserve à la superficie de celle-ci. Or, les nappes fluviales se présentent généralement sous forme de bandes le long des vallées. Il n'est donc pas impossible que le rapport $\frac{s}{S}$ soit le même quelle que soit la superficie du bassin, pourvu que celui-ci soit assez grand pour que les vallées aient un développement suffisant. K dépend uniquement de la perméabilité du sol dans lequel est stockée la réserve. En conclusion, que K soit constant d'une part, $\frac{s}{S}$ d'autre part, ou que ces deux facteurs varient en sens inverse, de telle façon que $K \frac{s}{S}$ garde la même valeur, on ne doit pas s'étonner de trouver pour α des valeurs analogues sur des bassins de superficies très différentes.

Les coefficients α des affluents du NIGER ont tous des valeurs légèrement inférieures aux précédentes. La plus faible est observée sur le Haut NILO à KONSANKORO (bassin assez foresté). Pour le TINKISSO, on observe, fin février, une cassure de la courbe de tarissement qui prend alors une pente plus forte ; nous ne

TABLEAU IX

BASSINS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Etude du tarissement

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

Valeurs moyennes de α

=====	
<u>NIGER</u>	
NIGER à FARANAH	0,022
NIGER à KOUROUSSA	0,023
NIGER à DIALAKORO	0,022
NIGER à SIGUIRI	0,022
NIGER à KOULIKORO	0,024
NIANDAN à BARO	0,021
MILO à KONSANKORO	0,016
MILO à KANKAN	0,019
SANKARANI à MANDIANA	0,017
SANKARANI à GOUALA	0,020
TINKISSO à TINKISSO	0,017 - 0,032
<u>BANI</u>	
BAOULE à BOUGOUNI	0,025
BAOULE à DIOILA	0,024
BAGOE à PANKOUROU	?
BANI à DOUNA	0,016
BANI à BENENY-KEGNY	0,0094
BANI à SOFARA	0,014
=====	

pouvons actuellement affirmer qu'il s'agit d'un phénomène naturel et non d'une imprécision dans la partie basse de la courbe de tarage.

Le bassin supérieur du BANI, représenté par le BAOULE, se présente sensiblement comme le NIGER Supérieur, avec des valeurs de α en moyenne légèrement plus fortes. Par contre, le BANI lui-même bénéficie d'une auto régularisation due aux faibles pentes et aux zones d'épandage qui se traduit par des valeurs faibles du coefficient α , phénomène surtout sensible, ce qui est assez curieux, à BENENY-KEGNY.

L'apparition de l'étiage a lieu, en principe, au moment où la courbe de tarissement est interrompue par les premières pluies de l'année hydrologique suivante. Mais ces premières pluies sont le plus souvent trop faibles et surtout trop espacées pour réalimenter sérieusement les nappes. Il faut attendre un certain temps pour que les eaux commencent réellement à monter.

Il en résulte que l'on assiste en général à la fin de la saison sèche, lorsque les tornades isolées commencent à se faire sentir, à une série de petites crues en dents de scies tandis que les réserves continuent à se vider. Ce phénomène est observé le plus fréquemment en Mars et Avril.

Les apports météoriques et les écoulements commencent à s'équilibrer en Mai, compte tenu des pertes par évaporation. Il en résulte que les étiages ont lieu le plus souvent fin Avril - début Mai.

La rigueur d'un étiage dépend de deux facteurs :

- L'importance et la date de la dernière crue
- La précocité de la saison des pluies suivante.

Il se trouve qu'en régime tropical de transition, les intervalles de temps séparant le début du tarissement des premières pluies capables de régénérer les réserves ne permettent pas un épuisement total des nappes pour un bassin d'une certaine étendue. Il existe pratiquement une limite statistique au-dessous de la-

quelle le débit de la rivière ne peut pas descendre. Cette limite fait partie des caractéristiques que nous allons essayer de dégager au cours des paragraphes suivants.

II - ETUDE STATISTIQUE DES ETIAGES ABSOLUS A LA STATION DE KOULIKORO

La liste des étiages classés du NIGER à KOULIKORO, avec leurs fréquences naturelles prises égales à $\frac{n - 1/2}{N}$ figure sur le tableau X.

La loi de répartition statistique doit tenir compte d'une borne inférieure et un simple coup d'oeil sur le tableau X montre qu'elle est nettement dissymétrique. Les études effectuées jusqu'à présent sur les étiages des rivières tropicales de transition montrent qu'une loi de Gauss tronquée rend compte de leur distribution statistique de façon assez satisfaisante. Nous avons utilisé des troncatures logarithmiques (Gibrat-Gauss) et des troncatures de la forme $\sqrt{q - q_0}$ ou plus généralement $(q - q_0)^n$ avec $n < 1$. Dans le cas de KOULIKORO, la loi de Gibrat-Gauss semble très bien convenir. Elle s'exprime au moyen des deux équations :

$$P(q) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2} dz$$

$$z = a \log (q - q_0) + b$$

Etant donné l'imprécision des mesures de très basses-eaux, nous nous contenterons d'un ajustement graphique. On trouve :

$$q_0 = 15 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$a = 1,72$$

$$b = -2,28$$

TABLEAU X

NIGER à KOULIKORO

Etiages absolus classés

(Débits en m³/s)

N°	Fréquences	Débits	N°	Fréquences	Débits
1	0,01	18	26	0,51	36
2	0,03	19	27	0,53	36
3	0,05	19	28	0,55	36
4	0,07	19,5	29	0,57	37
5	0,09	21	30	0,59	37
6	0,11	21	31	0,61	38
7	0,13	23	32	0,63	39
8	0,15	23	33	0,65	39
9	0,17	23	34	0,67	48
10	0,19	25	35	0,69	48
11	0,21	26	36	0,71	51
12	0,23	26	37	0,73	60
13	0,25	26	38	0,75	61
14	0,27	27	39	0,77	64
15	0,29	27	40	0,79	66
16	0,31	28	41	0,81	66
17	0,33	30	42	0,83	69
18	0,35	31	43	0,85	73
19	0,37	32	44	0,87	78
20	0,39	34	45	0,89	85
21	0,41	34	46	0,91	89
22	0,43	34	47	0,93	105
23	0,45	35	48	0,95	107
24	0,47	36	49	0,97	130
25	0,49	36	50	0,99	137

La courbe correspondante, ainsi que les valeurs observées, sont portées sur le graphique 12 établi en coordonnées gaussio-logarithmiques, de façon que la courbe calculée soit une droite.

L'étiage décennal est de 21 m³/s

La valeur la plus fréquente est, d'après la loi théorique :

$$q = q_0 + e \quad \left[b + \frac{1}{2 a M} \right] \quad \text{avec } M = 0,434$$

on trouve ici : $q = \underline{32 \text{ m}^3/\text{s}}$. Dans l'échantillon dont nous disposons, la valeur la plus fréquemment observée est 36 m³/s.

La valeur moyenne, d'après la formule admise, est

$$\frac{1}{a M} \left(\frac{1}{4 a M} - b \right)$$

$q = q_0 + e \quad \neq 48 \text{ m}^3/\text{s}.$

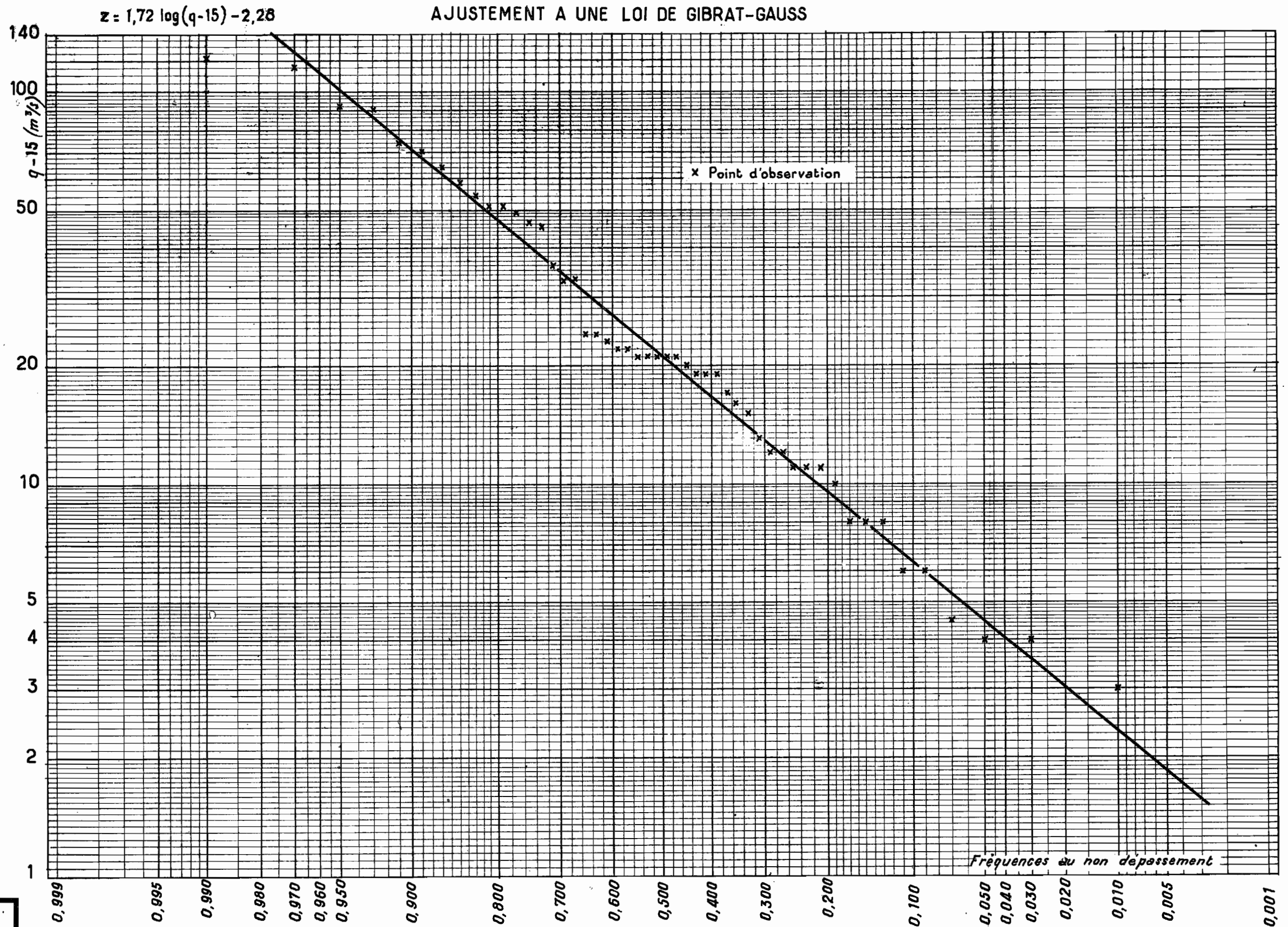
La valeur moyenne de l'échantillon est de 46 m³/s.

III - ETIAGES DU BANI ET DES AFFLUENTS DU NIGER SUPERIEUR

Nous avons écrit au paragraphe II que la sévérité de l'étiage dépend entre autres de la précocité de la saison des pluies suivante. L'influence est certaine, mais si l'on tient compte du fait qu'il faut des pluies assez importantes pour interrompre définitivement le tarissement, les dates d'arrivée de ces pluies, qui ne sont plus des tornades très espacées, sont à peu près les mêmes, pour une année donnée, sur la totalité du bassin du NIGER Supérieur. Si l'on ajoute que, pour les différents bassins partiels, les hydraulicités de la saison des pluies précédant l'étiage considéré ont été sensiblement les mêmes (homogénéité des pluviosités), il est naturel de penser qu'il existe une corrélation assez étroite entre les étiages absolus aux stations correspondantes.

Répartition statistique des étiages absolus

AJUSTEMENT A UNE LOI DE GIBRAT-GAUSS



La mise en graphique des étiages absolus aux différentes stations du NIGER Supérieur et de ses affluents corrobore ce point de vue. On peut même adopter une représentation linéaire passant par l'origine, ce qui entraîne des répartitions statistiques analogues. Les éléments statistiques calculés pour KOULIKORO peuvent donc être utilisés pour déterminer les éléments homologues des autres stations, la corrélation étant sans doute très serrée.

NIGER à KOUROUSSA :

$$q \text{ étiage KOUROUSSA} = 0,14 \quad q \text{ étiage KOULIKORO}$$

Etiage limite	2,1 m ³ /s
Etiage décennal	3 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	4,5 m ³ /s
Etiage moyen	6,7 m ³ /s

NIGER à DIALAKORO :

$$q \text{ étiage DIALAKORO} = 0,75 \quad q \text{ étiage KOULIKORO}$$

Etiage limite	11 m ³ /s
Etiage décennal	16 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	24 m ³ /s
Etiage moyen	36 m ³ /s

NIANDAN à BARO :

$$q \text{ étiage BARO} = 0,24 \quad q \text{ étiage KOULIKORO}$$

Etiage limite	3,6 m ³ /s
Etiage décennal	5,0 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	7,7 m ³ /s
Etiage moyen	11,5 m ³ /s

MILO à KONSANKORO (ordres de grandeur)

q étiage KONSANKORO = 0,06 q étiage KOULIKORO

Etiage limite	0,9 m ³ /s
Etiage décennal	1,2 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	2 m ³ /s
Etiage moyen	3 m ³ /s

MILO à KANKAN

q étiage KANKAN = 0,23 q étiage KOULIKORO

Etiage limite	3,5 m ³ /s
Etiage décennal	4,8 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	7,4 m ³ /s
Etiage moyen	11 m ³ /s

SANKARANI à MANDIANA

q étiage MANDIANA = 0,31 q étiage KOULIKORO

Etiage limite	4,6 m ³ /s
Etiage décennal	6,5 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	10 m ³ /s
Etiage moyen	15 m ³ /s

SANKARANI à GOUALA

q étiage GOUALA = 0,27 q étiage KOULIKORO

Etiage limite	4,0 m ³ /s
Etiage décennal	5,7 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	8,6 m ³ /s
Etiage moyen	13 m ³ /s

Les mesures de basses eaux du TINKISSO sont trop imprécises pour que nous puissions avancer des chiffres valables.

On voit que les valeurs ainsi déterminées sont bien inférieures à celles qui se dégagent à première vue des observations. C'est que celles-ci portent sur une période pendant laquelle les étiages ont été particulièrement élevés ainsi que le montrent les observations relatives à KOULIKORO. Un calcul statistique basé sur les seules valeurs observées conduirait à des résultats complètement aberrants même pour le NIANDAN et pour le MILO.

Pour le BANI, les estimations sont beaucoup plus difficiles. D'une part, les relations $Q(H)$ en basses-eaux sont assez mal connues, sauf à DOUNA. D'autre part, il n'est plus question de se rattacher à KOULIKORO pour augmenter la grandeur d'un échantillonnage insuffisant.

En fait, le problème est plus compliqué que pour le Haut NIGER limité à KOULIKORO et il faut distinguer trois parties nettement distinctes :

a)- Le BAGOE, jusqu'à PANKOUROU, et le BAOULE, presque jusqu'à DIOILA, drainent une aire essentiellement granitique (antécambrien) ou schisto-quartzitique (précambrien). Ces deux bassins d'alimentation du BANI doivent fonctionner, du point de vue réserves, à peu près de la même façon que le bassin du NIGER Supérieur avec toutefois deux différences essentielles : pentes plus faibles des versants et du lit des cours d'eau, arrosage moins abondant. La pluviométrie décroît notablement du sud au nord et l'évaporation s'accroît avec l'élévation de la température moyenne et du déficit hygrométrique avec la latitude, phénomène surtout sensible en saison sèche au moment de l'étiage. Il résulte de ces remarques que les débits absolus d'étiage vont croître de la tête du bassin vers l'aval jusqu'à un maximum, puis décroître. La position du maximum et sa valeur seront fixés chaque année par le jeu des facteurs pluviosité et évaporation.

Pour le BAOULE qui coule dans la zone granitique presque jusqu'au confluent, le débit parvient à s'annuler pratiquement certaines années. Il ne semble pas qu'il en soit ainsi du BAGOE, réalimenté après

PANKOUROU par les réserves de la zone gréseuse. Le tarissement total du bas-BAOULE dénote une influence tropicale pure.

b)- La partie inférieure du BAGOE, le grand BANIFING et le cours supérieur du BANI bénéficient des réserves de la zone gréseuse, plus importantes. La valeur des étiages remonte nettement, ainsi qu'en témoignent les relevés de DOUNA.

c)- Puis viennent les profondes alluvions qui annoncent la cuvette lacustre. Le cours du BANI draine à la fois les réserves de la zone gréseuse et de la zone alluvionnaire. Au début, les débits d'étiage croissent d'amont en aval. Ensuite, l'évaporation, activée par la présence de marécages permanents, n'est plus compensée par les apports des nappes et les débits d'étiage décroissent à nouveau jusqu'au confluent.

On conçoit, d'après cet exposé, qu'il soit pratiquement impossible, en l'absence de relevés effectués sur de longues périodes, de dégager des valeurs statistiques pour les branches BAGOE et BAOULE.

Sur le cours même du BANI, on peut se montrer plus optimiste, malgré une période de relevés relativement courte, par suite de la régularisation due aux nappes alluvionnaires et, de façon moins efficace, aux réserves de la zone gréseuse. Il n'est pas question de faire une étude statistique poussée, mais nous croyons pouvoir avancer quelques ordres de grandeur.

BANI à DOUNA

Etiage limite	5 à 6 m ³ /s
Etiage décennal	10 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	15 à 20 m ³ /s
Etiage moyen	20 à 25 m ³ /s

BANI à BENENY-KEGNY

Etiage limite	35 à 40 m ³ /s
Etiage décennal	40 à 45 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	50 m ³ /s
Etiage moyen	55 à 60 m ³ /s

BANI à SOFARA

Etiage limite	15 à 20 m ³ /s
Etiage décennal	20 à 25 m ³ /s
Etiage le plus fréquent	25 m ³ /s
Etiage moyen	30 m ³ /s

Nous insistons sur le fait qu'il s'agit là d'ordres de grandeur qui paraissent raisonnables, mais donnés sous toutes réserves.

Nous pouvons dresser maintenant le tableau XI qui résume les résultats de cette étude. Les débits d'étiages sont exprimés en valeurs spécifiques, de façon à faciliter les comparaisons et l'application pratique à un projet éventuel.

TABLEAU XI

DONNEES STATISTIQUES RELATIVES AUX ETIAGES ABSOLUS

Débits spécifiques en l/s.km²

	Limite inférieure	Valeur décennale	Etiage le plus fréquent	Valeur moyenne
<u>Haut-NIGER</u>				
NIGER à KOUROUSSA 18.000 km ²	0,12	0,17	0,25	0,37
NIGER à DIALAKORO 71.000 km ²	0,15	0,23	0,34	0,51
NIGER à KOULIKORO 120.000 km ²	0,12	0,18	0,27	0,40
NIANDAN à BARO 12.600 km ²	0,29	0,40	0,61	0,91
MILO à KONSANKORO 1.000 km ²	0,9	1,2	2	3
MILO à KANKAN 9.900 km ²	0,35	0,49	0,75	1,11
SANKARANI à MANDIANA 21.900 km ²	0,21	0,30	0,46	0,68
SANKARANI à GOUALA 35.300 km ²	0,11	0,16	0,24	0,37
<u>BANI</u>				
BANI à DOUNA 101.600 km ²	0,05 - 0,06	0,10	0,15 - 0,20	0,20 - 0,25
BANI à BENENY-KEGNY 116.000 km ²	0,30 - 0,35	0,35 - 0,39	0,43	0,47 - 0,52
BANI à SOFARA 129.400 km ²	0,12 - 0,15	0,15 - 0,19	0,19	0,23

C H A P I T R E I I I

ETUDE DES CRUES

Dans ce chapitre, nous étudierons en réalité les maxima annuels et non les crues dans toute leur complexité, ce qui nous entraînerait beaucoup trop loin. Par maximum annuel, nous entendons : débit le plus fort observé au cours de l'année ; ce n'est pas en général le véritable maximum puisque les observations ne sont effectuées qu'une fois par jour. Cependant, pour un grand bassin, les valeurs maximales réelles et observées sont très voisines, parfois confondues. Pour un bassin plus petit, inférieur par exemple à 20.000 km², on peut espérer que le maximum observé représente, en moyenne, le débit moyen journalier le plus fort.

L'expérience montre que ces approximations sont parfaitement admissibles, surtout si le projet étudié comporte une régularisation, si faible soit-elle, d'autant plus que le NIGER, fleuve tropical de transition d'abondance modérée, présente des crues qui ne sont pas très brutales.

Par ailleurs, dans le cas de ce régime comportant une seule saison des pluies, les crues successives se produisant au cours de cette saison, sans qu'il y ait même l'amorce d'un tarissement véritable, au sens où nous l'avons pris dans le chapitre précédent, ne peuvent absolument pas être considérées comme indépendantes les unes des autres. Il ne nous paraît donc pas indiqué de prendre en compte, pour l'étude statistique, toutes ou même quelques unes des différentes pointes de crues observées durant l'année.

Ici encore, la station de KOULIKORO, observée pendant 51 ans, servira de base à l'étude statistique. Sur les autres stations du Haut-NIGER et du BANI, l'extension des données expérimentales est plus délicate que pour les modules, la pluviométrie étant trop imprécise et l'étude analytique trop peu poussée.

pour nous rendre un quelconque service.

Dans ce chapitre, on trouvera successivement :

- Les éventualités des crues, c'est-à-dire la répartition de leurs fréquences d'arrivée au cours de la saison des pluies.
- Une étude détaillée des maxima de KOULIKORO.
- L'étude des crues sur les autres stations du NIGER Supérieur et de ses affluents.
- Les crues du BANI.
- Un condensé des résultats relatifs aux stations d'observation.
- Une tentative de généralisation de ces résultats à l'ensemble des deux bassins.

I - EVENTUALITES DES CRUES DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Le simple fait d'être en régime tropical nord détermine déjà les limites d'une période en dehors de laquelle nous savons à priori que le maximum annuel ne peut avoir lieu. Ces limites sont fixées par le déplacement apparent du soleil et par suite du Front Intertropical (1er volume de cette monographie) : ce sont approximativement le 15 Juillet et le 30 Novembre.

Nous nous proposons de préciser ces limites pour le cas particulier du NIGER et du BANI et surtout d'étudier sommairement la répartition des fréquences d'apparition des maxima, à l'intérieur de cette période.

Pour chaque station limnimétrique, on a dressé le répertoire du nombre de maxima observés pendant chaque décade de la saison des pluies. La durée de cette période de base est évidemment arbitraire : elle a été choisie de façon que l'analyse soit suffisamment fine tout en conservant un nombre significatif d'observations dans chaque tranche ainsi découpée dans la saison des pluies. De plus, nous avons considéré que chaque mois comportait 3 décades, même si la dernière

est en réalité de 11 jours. Cette légère incorrection, destinée à faciliter le découpage, ne présente pas d'inconvénient sur le plan pratique.

Les résultats sont réunis sur le tableau XII. La colonne "Août" se rapporte, en principe, à la dernière décade de ce mois ; nous n'avons pas précisé l'intervalle parce qu'en réalité une ou deux crues sont intervenues au cours de la seconde décade. Il était inutile de charger le tableau par l'adjonction d'une colonne supplémentaire.

L'examen du tableau XII montre qu'aucune très forte crue ne s'est produite sur aucun affluent du Haut-NIGER avant le mois d'Août. Seuls sont affectés par les maxima d'Août, les cours d'eau issus de la GUINEE forestière.

Sur le BANI et ses deux branches mères principales, les maxima se produisent au plus tôt pendant la seconde décade de septembre. Nous mettons à part, comme fortement suspect, le maximum qui se serait produit en Août 1955, à la station de DIOILA, sur le BAOULE.

Enfin, les maxima peuvent se produire au plus tard, tant pour le NIGER que pour le BANI, durant la seconde décade de Novembre. Les crues très tardives du BANI à SOFARA et à BENENY KEGNY sont dues à la propagation extrêmement lente des crues sur cette rivière, à l'aval de DOUNA (zones d'inondation, pentes très faibles). Il est probable qu'avec une période d'observation plus longue on aurait enregistré, à ces deux stations, des maxima durant la troisième décade de Novembre et sans doute même en Décembre.

En résumé, on peut dresser pour les dates extrêmes d'arrivée des maxima annuels sur l'ensemble des deux bassins (hormis le bas-BANI) le tableau suivant :

NIGER Supérieur et TINKISSO	: 1er Septembre - 20 Novembre
Affluents rive droite du NIGER Supérieur	: 10 Août - 20 Novembre
BANI jusqu'à DOUNA	: 10 Septembre - 20 Novembre

TABLEAU XII

BASSINS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Etude des crues - Eventualités des dates d'arrivée des maxima annuels
aux différentes stations

Stations	Durée de référence	Août	Septembre			Octobre			Novembre	
			1-10	11-20	21-30	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20
<u>NIGER</u>										
NIGER à FARANAH	3 ans				1	1	1			
NIGER à KOUROUSSA	15 ans		1	3	6	3		1		1
NIGER à DIALAKORO	6 ans		1	1	2	2				
NIGER à KOULIKORO	51 ans		2	11	17	15	5			1
NIANDAN à BARO	11 ans	2	3	3	2				1	
MILO à KONSANKORO	3 ans			2	1					
MILO à KANKAN	17 ans	4	3	1	5	3		1		
SANKARANI à MANDIANA	4 ans	1		1	1					1
SANKARANI à GOUALA	4 ans			2	1	1				
TINKISSO à TINKISSO	3 ans				3					
<u>BANI</u>										
BAOULE à BOUGOUNI	2 ans				1	1				
BAOULE à DIOILA	5 ans	1		1	2		1			
BAGOE à PANKOUROU	2 ans				1	1				
BANI à DOUNA	8 ans				4	2	1	1		
BANI à BEN. KEGNY	5 ans					1	3	1		
BANI à SOFARA	5 ans						1	2	1	1

Le groupement que nous venons d'effectuer suggère un nouvel aspect du tableau de répartition tenant compte, non plus de cours d'eau particuliers, mais de régions géographiques plus ou moins homogènes. Dans le tableau XIII, on a obtenu de cette façon une simplification appréciable. Les chiffres indiqués dans les différentes colonnes se rapportent, d'une part, aux nombres de maxima observés pendant la période de l'année portée en tête de colonne, d'autre part, aux pourcentages que représentent ces nombres par rapport au nombre total d'observations porté dans la seconde colonne du tableau. On peut ainsi noter que :

- Pour le NIGER Supérieur, ses affluents et le BANI jusqu'à DOUNA, la fréquence maximale d'apparition des crues annuelles se situe pendant la troisième décade de Septembre.

Malgré cette simultanéité des fréquences maximales, les distributions statistiques dans le temps sont loin d'être semblables pour les trois régions précitées. En fait, les maxima annuels des affluents rive droite du Haut-NIGER (venant de GUINEE forestière) ont des fréquences d'apparition, donc des éventualités beaucoup plus étalées : les chances qu'ils ont de se produire pendant la seconde ou la troisième décade de septembre sont sensiblement égales. Les éventualités d'août et de la première décade de septembre sont loin d'être négligeables.

- Pour le NIGER Supérieur et le TINKISSO, la répartition des fréquences est beaucoup plus "pointue" ; on observe un étalement sur la première décade d'Octobre. La "sélectivité" s'accroît encore sur le BANI Supérieur jusqu'à DOUNA ; on observe sur cette région un étalement des fréquences jusqu'à la seconde décade d'Octobre alors qu'elles tombent à 5% environ pendant la seconde décade de Septembre.

- Sur le BANI Inférieur (BENENY-KEGNY et SOFARA), le décalage du maximum de fréquence est net puisqu'il se situe dans la seconde décade d'octobre avec un étalement sur la troisième décade du même mois.

Notons que, pour le BANI, les pourcentages inférieurs à 10 sont très peu significatifs étant donné le faible nombre d'observations.

TABLEAU XIII

BASSINS du NIGER SUPERIEUR et du BANI

Etude des crues - Eventualités des dates d'arrivée des maxima annuels
dans les différentes régions du bassin

Bassins	Durée de référence	Août	Septembre			Octobre			Novembre	
			1-10:11-20:21-30:			1-10:11-20:21-30:			1-10:11-20:	
Affluent rive droite du NIGER	39 ans	7 :18%	6 :15,4%	9 :23%	10 :25,5%	4 :10,3%		1 :2,6%	1 :2,6%	1 :2,6%
NIGER et TINKISSO	78 ans		4 :5,1%	15 :19,2%	29 :37,2%	21 :26,9%	6 :7,7%	1 :1,3%		2 :2,6%
BANI jusqu'à DOUNA	18 ans	1 :5,5%		1 :5,5%	8 :44,5%	4 :22,2%	2 :11,1%	1 :5,5%		
BANI inférieur	10 ans					1 :10%	4 :40%	3 :30%	1 :10%	1 :10%

Le tableau XIII a permis de construire les histogrammes du graphique 13. Sur ce graphique les décalages sont particulièrement visibles.

L'étude précédente permet d'effectuer un nouveau classement des 4 régions intéressées qui exprime avec plus de netteté les caractéristiques propres de ces régions du point de vue apparition des crues. Dans le tableau suivant, nous n'avons retenu que les valeurs les plus significatives, c'est-à-dire les fréquences d'apparition supérieures à 10%. Les dates indiquées limitent les périodes pendant lesquelles on a des chances supérieures à 10% de voir apparaître le maximum annuel dans un intervalle de 10 jours.

Affluents rive droite du NIGER Supérieur	10 Août - 10 Octobre
NIGER Supérieur et TINKISSO	10 Septembre - 10 Octobre
BANI jusqu'à DOUNA	20 Septembre - 20 Octobre
BANI Inférieur	10 Octobre - 30 Octobre

II - ETUDE STATISTIQUE DES CRUES A KOULIKORO

On dispose, à la station de KOULIKORO, d'un échantillon de 51 maxima annuels qui figurent, classés par ordre décroissant, sur le Tableau XIV. Les fréquences qui figurent dans la deuxième colonne sont des fréquences naturelles au dépassement calculées d'après le numéro de classement n suivant la formule $F_1 = \frac{n - 1/2}{N}$

(voir chapitre I, étude statistique des modules).

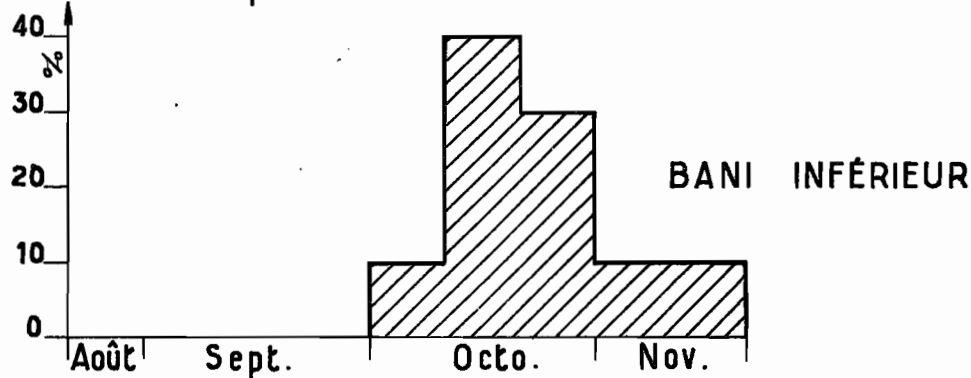
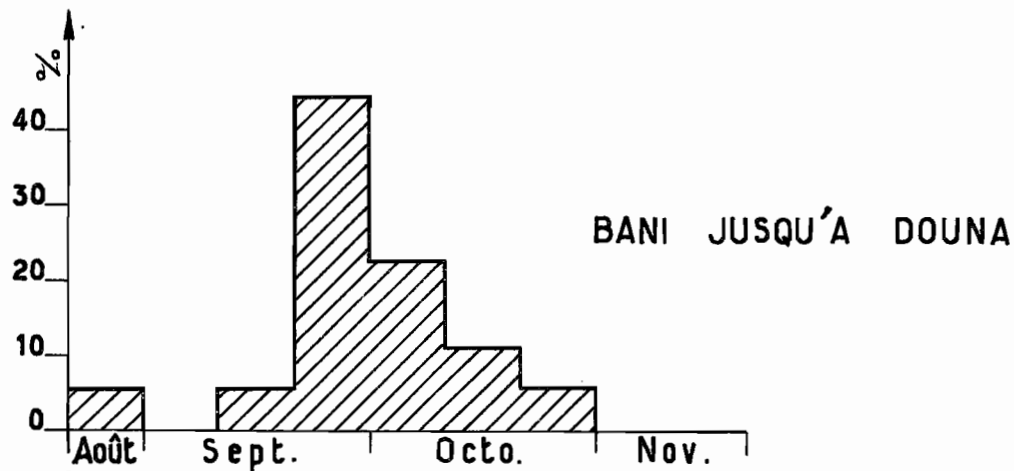
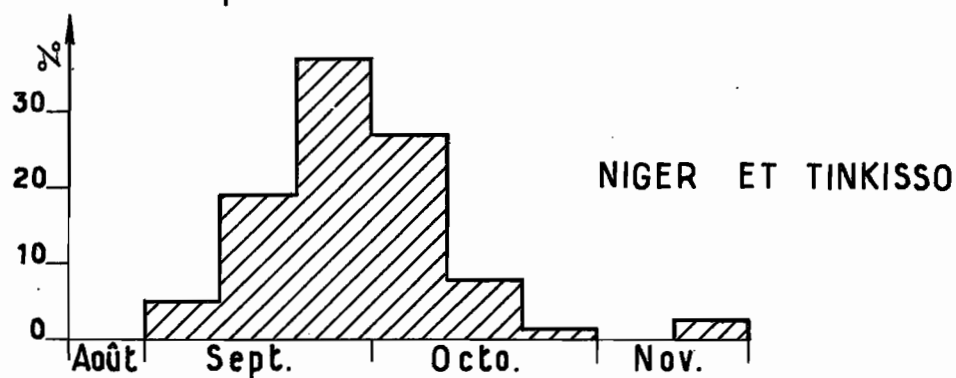
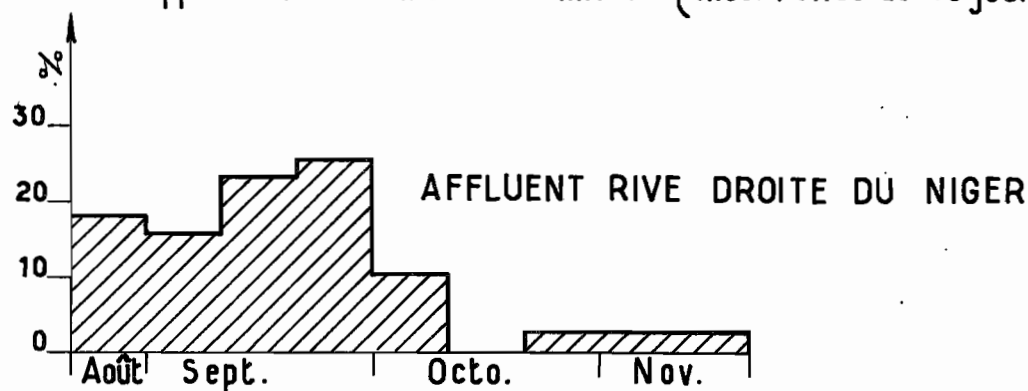
Cet échantillon sera étudié tel quel, quitte par la suite à faire des réserves concernant certaines valeurs. Après application de la plupart des lois actuellement utilisées pour représenter la répartition statistique des crues, nous avons retenu :

- la loi de GOODRICH
- la loi de GIBRAT GAUSS
- la loi III de PEARSON.

Bassin du NIGER SUPÉRIEUR et du BANI

Gr 13

Répartition au cours de la saison des pluies pour différentes régions des fréquences d'apparition des maxima annuels (intervalles de 10 jours)



NIG 8283

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED:

LE: 7-4-59

DES: J. Métyer

VISA:

TUBE N°:

AO

TABLEAU XIV

NIGER à KOULIKORO

Maxima annuels classés

N°	Fréquences	Débits m ³ /s	N°	Fréquences	Débits m ³ /s	N°	Fréquences	Débits m ³ /s
1	0,00980	9.700	18	0,34314	6.540	34	0,65686	5.580
2	0,02941	9.500	19	0,36275	6.480	35	0,67647	5.505
3	0,04902	8.740	20	0,38235	6.440	36	0,69608	5.375
4	0,06863	7.740				37	0,71569	5.375
5	0,08824	7.640	21	0,40196	6.440	38	0,73529	5.285
6	0,10784	7.610	22	0,42157	6.420	39	0,75490	5.240
7	0,12745	7.560	23	0,44118	6.380	40	0,77451	5.220
8	0,14706	7.456	24	0,46078	6.360			
9	0,16667	7.400	25	0,48039	6.280	41	0,79412	5.180
10	0,18627	7.020	26	0,50000	6.220	42	0,81373	5.100
			27	0,51961	6.210	43	0,83333	4.980
11	0,20588	6.980	28	0,53922	6.170	44	0,85294	4.980
12	0,22549	6.960	29	0,55882	6.002	45	0,87255	4.920
13	0,24510	6.960	30	0,57843	5.910	46	0,89216	4.920
14	0,26471	6.940				47	0,91176	4.830
15	0,28431	6.900	31	0,59804	5.790	48	0,93137	4.467
16	0,30392	6.840	32	0,61765	5.670	49	0,95098	4.290
17	0,32353	6.740	33	0,63725	5.610	50	0,97059	4.010
						51	0,99020	3.646

Chacune de ces lois comporte 2 ou 3 paramètres d'ajustement qu'il s'agit d'estimer au mieux à partir des données d'observations. Suivant la forme analytique de la loi appliquée, nous avons effectué une estimation directe par la méthode du maximum de vraisemblance, ou nous sommes passés par l'intermédiaire d'estimateurs. Nous rappelons brièvement en quoi consistent ces deux méthodes d'ajustement.

Méthode du maximum de vraisemblance

On appelle vraisemblance d'un échantillon composé de N valeurs x_1, x_2, \dots, x_N , auxquelles correspondent des densités de probabilités f_1, f_2, \dots, f_N , une quantité proportionnelle au produit

$$\mathcal{L} = f_1 f_2 \dots f_N$$

La fonction f qui définit entièrement la loi de probabilité, comporte un certain nombre de paramètres d'ajustement a, b, \dots, k . La méthode du maximum de vraisemblance consiste à déterminer a, b, \dots, k , de façon que \mathcal{L} soit le plus grand possible, c'est-à-dire à former le système :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial k} = 0$$

qui peut être remplacé, en effectuant les opérations sur les logarithmes de \mathcal{L} , par le système :

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} \frac{\partial f_i}{\partial a} = 0$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} \frac{\partial f_i}{\partial b} = 0$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} \frac{\partial f_i}{\partial k} = 0$$

Détermination des paramètres par l'intermédiaire d'estimateurs

On appelle ainsi des variables intermédiaires pouvant être estimées à partir des données d'observations et en fonction desquelles on peut exprimer les paramètres. Nous utiliserons comme estimateurs la moyenne arithmétique (\bar{x}), la variance σ^2 et le moment centré de 3ème ordre (M_3), dont une estimation absolument correcte peut être faite à partir des données expérimentales au moyen des relations :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

$$M_3 = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum (x_i - \bar{x})^3$$

1 - Application de la loi de Goodrich

Cette loi est généralement donnée sous la forme :

$$q(T) = \alpha \left[1 + \beta (\log T)^n \right]$$

(1) Le moment d'origine zéro m_2 serait égal à

$$\frac{1}{n-1} \sum x_i^2$$

où $q(T)$ représente le débit maximal de crue correspondant à la période de récurrence de durée T (en années). On en déduit la loi de probabilités pour que le débit ne soit pas dépassé

$$P(q) = 1 - e^{-2,3026 \left(\frac{q - \alpha}{\beta} \right)^{\frac{1}{n}}}$$

et, en posant $A = 2,3026 (\alpha \beta)^{-\frac{1}{n}}$, la densité de probabilités :

$$f(q) = \frac{1}{n} A (q - \alpha)^{\frac{1}{n} - 1} e^{-A (q - \alpha)^{\frac{1}{n}}} \quad (\alpha \leq q < +\infty)$$

On montre que la loi de GOODRICH n'admet pas de maximum de vraisemblance. Pour la détermination des 3 paramètres A , n et α , il nous faut donc choisir trois estimateurs, nous avons pris q , σ^2 et μ_3 .

- Calcul de la moyenne

$$\text{C'est par définition } \bar{q} = \int_{-\infty}^{+\infty} q f(q) dq$$

soit ici, en tenant compte de l'intervalle de variation admissible pour q

$$\bar{q} = \int_{\alpha}^{+\infty} q \frac{A}{n} (q - \alpha)^{\frac{1}{n} - 1} e^{-A (q - \alpha)^{\frac{1}{n}}} dq$$

L'intégration s'effectue en faisant le changement de variable $u = A (q - \alpha)^{\frac{1}{n}}$ et on trouve finalement $\bar{q} = \frac{1}{A^n} \Gamma(n+1) + \alpha$

$\Gamma(n+1)$ est l'intégrale eulérienne de seconde espèce d'argument $(n+1)$. Sa valeur numérique est donnée par des tables.

- Calcul de la variance

La variance ou moment centré de second ordre est définie par la relation :

$$\mu_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (q - \bar{q})^2 f(q) dq$$

on l'exprime à partir du moment simple de second ordre m_2 (1) par

$$\mu_2 = m_2 - \bar{q}^2$$

On a ici, en adoptant le même changement de variable que ci-dessus :

$$m_2 = \int_0^{+\infty} \left[\left(\frac{u}{A} \right)^n + \alpha \right]^2 e^{-u} du$$

Ce qui donne après intégration :

$$m_2 = \frac{1}{A^{2n}} \Gamma(2n+1) + 2 \frac{\alpha}{A^n} \Gamma(n+1) + \alpha^2$$

- Calcul du moment de 3ème ordre

Le moment centré de troisième ordre est donné par la relation :

$$\mu_3 = m_3 - 3 \bar{q} \sigma^2 + \bar{q}^3$$

$$(1) \quad m_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} q^2 f(q) dq$$

$$\text{Or } m_3 = \int_0^{+\infty} \left[\left(\frac{u}{A} \right)^n + \alpha \right]^3 e^{-u} du$$

D'où, après intégration :

$$m_3 = \frac{1}{A^{3n}} \Gamma(3n + 1) + 3 \frac{\alpha}{A^{2n}} \Gamma(2n + 1) + 3 \frac{\alpha^2}{A^n} \Gamma(n + 1) + \alpha^3$$

En combinant et en simplifiant les relations précédentes, on obtient le système résolutif suivant :

$$(\alpha - \bar{q}) + \frac{1}{A^n} \Gamma_1 = 0$$

$$-(\alpha - \bar{q})^2 + \frac{1}{A^{2n}} \Gamma_2 = \sigma^2$$

$$(\alpha - \bar{q})^3 + \frac{1}{A^{3n}} \Gamma_3 = \mu_3 - 3 \sigma^2 (\alpha - \bar{q})$$

où $\Gamma_1 = \Gamma(n + 1)$, $\Gamma_2 = \Gamma(2n + 1)$ et $\Gamma_3 = \Gamma(3n + 1)$

La résolution de ce système permet d'obtenir une relation en n seul.

$$\varphi(n) = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \left(\Gamma_2 - \Gamma_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{\Gamma_3 - \Gamma_1^3}{\Gamma_2 - \Gamma_1^2} - 3 \Gamma_1 \right]$$

d'où l'on déduit la valeur de n par construction graphique de la courbe $\varphi(n)$ en utilisant les valeurs estimées de \bar{q} , σ et μ_3 . On explicite ensuite α et A par les deux relations suivantes :

$$\alpha - \bar{q} = - \frac{\sqrt{1} \sigma}{\left(\sqrt{2} - \sqrt{1}^2 \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$A = \left[\frac{\sigma^2}{\sqrt{2} - \sqrt{1}^2} \right]^{\frac{1}{2n}}$$

On trouve, pour le NIGER à KOULIKORO :

$$\text{estimation } \bar{q} = \frac{1}{N} \sum q_i = 6.206 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{estimation } \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum (q_i - \bar{q})^2 = 1.594.159$$

$$\text{estimation } \mu_3 = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum (q_i - \bar{q})^3 = 1.160.341.28$$

$$\text{d'où } \frac{\mu_3}{\sigma^3} = 0,57630 \text{ qui donne } \underline{n = 0,480}$$

Les autres relations donnent :

$$\begin{aligned} A &= 6,444 \times 10^{-8} \\ \alpha &= 3\,699 \end{aligned}$$

La loi de probabilité peut s'écrire :

$$P_1(q) = e^{-6,444 \times 10^{-8} (q - 3,699)^{\frac{1}{0,480}}}$$

$P_1(q)$ désigne cette fois la probabilité pour que q soit égalé ou dépassé : $P_1(q) = 1 - P(q)$

A partir de cette formule, on obtient respectivement :

Pour la crue décennale ($P_1 = 0,1$) $q \# \underline{7.900 \text{ m}^3/\text{s}}$

Pour la crue centenaire ($P_1 = 0,01$) $q \# \underline{9.600 \text{ m}^3/\text{s}}$

Pour la crue millénaire ($P_1 = 0,001$) $q \# \underline{10.900 \text{ m}^3/\text{s}}$

2 - Application de la loi de Gibrat-Gauss

On la donne traditionnellement sous forme d'un système de deux équations :

$$P(q) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2} dz$$

$$z = a \log(q - q_0) + b$$

La méthode du maximum de vraisemblance peut être utilisée sans trop de peine pour le calcul des paramètres.

En remplaçant, pour simplifier, les logarithmes décimaux par des logarithmes népériens ($z = a M L(q - q_0) + b$), la densité de probabilités est donnée, à un facteur constant près par l'expression :

$$\frac{a}{q - q_0} e^{-[a M L(q - q_0) + b]^2}$$

D'où à une constante près :

$$L f(q) \sim L a - L(q - q_0) - [a M L(q - q_0) + b]^2$$

L'application du maximum de vraisemblance conduit au système :

$$\frac{N}{a} - 2 a M^2 \sum L^2(q_i - q_0) - 2 M b \sum L(q_i - q_0) = 0$$

$$a M \sum L(q_i - q_0) + N b = 0$$

$$\sum \frac{1}{q_i - q_0} + 2 a^2 M^2 \sum \frac{1}{q_i - q_0} L(q_i - q_0) \\ + 2 a b M \sum \frac{1}{q_i - q_0} = 0$$

N est le nombre de valeurs contenues dans l'échantillon et $\frac{1}{M} = 2,3026$

On tire de ce système une relation en q_0 seul qui peut s'écrire, en revenant aux logarithmes décimaux :

$$\varphi(q_0) = \frac{1}{M} \sum \frac{1}{q_i - q_0} \left[\frac{1}{N} \sum \log^2(q_i - q_0) \right. \\ \left. - \frac{1}{N^2} \sum^2 \log(q_i - q_0) \right] + \sum \frac{1}{q_i - q_0} \log(q_i - q_0) \\ - \frac{1}{N} \sum \log(q_i - q_0) \sum \frac{1}{q_i - q_0} = 0$$

La résolution se fait graphiquement en traçant la courbe $\varphi(q_0)$.

Les deux autres paramètres sont donnés par les relations :

$$a = \frac{1}{\sqrt{2 \left[\frac{\sum \log^2(q_i - q_0)}{N} - \frac{\sum^2 \log(q_i - q_0)}{N^2} \right]}}$$

$$b = - \frac{a \sum \log(q_i - q_0)}{N}$$

Dans le cas du NIGER à KOULIKORO, on trouve en définitive :

$$\begin{aligned} q_0 & \# - 1.300 \text{ m}^3/\text{s} \\ a & = 9,86 \\ b & = - 38,153 \end{aligned}$$

La loi de probabilité peut donc s'écrire :

$$P(q) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2} dz$$

$$\text{avec } z = 9,86 \log(q + 1.300) - 38,153$$

En appliquant cette formule, on trouve respectivement :

$$\begin{aligned} \text{pour la crue décennale } q & = \underline{7.850 \text{ m}^3/\text{s}} \\ \text{pour la crue centenaire } q & \# \underline{9.600 \text{ m}^3/\text{s}} \\ \text{pour la crue millénaire } q & \# \underline{11.000 \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

3 - Application de la loi III de Pearson

Cette loi est définie par une densité de probabilité de la forme

$$f(q) = \frac{a^\gamma}{\Gamma(\gamma)} e^{-aq} q^{\gamma-1} dq$$

L'estimation des paramètres se fait très aisément par la méthode du maximum de vraisemblance.

$$\text{On a } L f(q) = \gamma L a - L \Gamma(\gamma) - a q + (\gamma - 1) L q$$

On obtient, en prenant les dérivés logarithmiques par rapport à a et à γ , le système suivant :

$$-La + \psi(\chi - 1) = \frac{\sum L q_i}{N}$$

$$\frac{\chi}{a} = \frac{\sum q_i}{N} = \bar{q}$$

La fonction $\psi(\chi - 1)$, dérivée logarithmique de $\Gamma(\chi)$ est également tabulée.

On tire de ce système l'équation en χ seul qui peut s'écrire, en passant aux logarithmes décimaux :

$$\varphi(\chi) = \log \chi - 0,4343 \psi(\chi - 1) = \log \bar{q} - \frac{\sum \log q_i}{N}$$

La courbe $\varphi(\chi)$ peut être établie une fois pour toutes :

$$a \text{ est donné par } a = \frac{\chi}{\bar{q}}$$

Les paramètres a et χ étant connus, la probabilité de non dépassement est donnée par l'intégrale

$$P(q) = \frac{a^\chi}{\Gamma(\chi)} \int_0^q e^{-aq} q^{\chi-1} dq$$

Le second membre se ramène, en posant $y = aq$, à :

$$P(q) = \frac{\Gamma_y(\chi)}{\Gamma(\chi)}$$

$\Gamma_y(\chi)$ est l'intégrale d'EULER incomplète.

Le rapport $\frac{\Gamma_y(\chi)}{\Gamma(\chi)} = I(y, \chi - 1)$ a été tabulé par Pearson.

L'échantillon de crues dont nous disposons fournit les valeurs :

$$\phi(\gamma) = \log \bar{q} - \frac{\sum \log q_i}{N} = 0,00870$$

ce qui donne $\gamma = 25,15$

et $a = \frac{\gamma}{\bar{q}} = 0,004053$

D'où :

$$P(q) = I(0,004053 q, 24,15)$$

Le calcul des fréquences à partir des tables de Pearson se fait par l'intermédiaire du paramètre

$$p = \gamma - 1 \text{ et de la variable } u = y / \sqrt{p + 1}$$

On trouve :

Pour la crue décennale $q \# \underline{7.800 \text{ m}^3/\text{s}}$

Pour la crue centenaire $q \# \underline{9.500 \text{ m}^3/\text{s}}$

Pour la crue millénaire $q \# \underline{10.800 \text{ m}^3/\text{s}}$

4 - Tests de signification

Nous utiliserons le test du χ^2 dont la définition est la suivante. L'échantillon étant divisé en un certain nombre de classes, si n_i est le nombre de valeurs observées contenues dans la classe i et v_i , le nombre de valeurs qui, sur un échantillon de N valeurs observées, est affecté par la loi théorique proposée à la classe i , on a :

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - v_i)^2}{v_i}$$

C'est une variable dont la distribution statistique a été étudiée par Pearson. Les valeurs de ses probabilités au dépassement dû au seul fait du hasard sont données par des tables en fonction de sa valeur propre et du nombre de degrés de liberté, c'est-à-dire du nombre d'opérations arbitraires que comporte son établissement.

L'échantillon de crues qui nous est soumis a été divisé arbitrairement en 9 classes selon le tableau suivant :

:=====			:Nombre de valeurs:
:N° de la classe:	:Bornes de la classe:	: expériméntales :	:
:	:	: n_i :	:
:-----	:-----	:-----	:-----
: 1	: 4.900	: 5	:
: 2	: 4.900 - 5.200	: 6	:
: 3	: 5.200 - 5.500	: 5	:
: 4	: 5.500 - 6.000	: 6	:
: 5	: 6.000 - 6.400	: 7	:
: 6	: 6.400 - 6.800	: 6	:
: 7	: 6.800 - 7.000	: 6	:
: 8	: 7.000 - 7.700	: 6	:
: 9	: 7.700	: 4	:
:	:	:	:
:=====			:

Le choix de 8 classes fixe obligatoirement la neuvième. On a donc, du fait du découpage, 8 degrés de liberté.

Dans le cas de la loi de Gibrat, trois paramètres ont été estimés, ce qui crée trois nouvelles liaisons entre les données d'observation. Le nombre de degrés de liberté est ramené à 5.

On trouve, en calculant les χ^2_i correspondant à chaque classe : $\chi^2 = 8,51$. La probabilité d'être dépassée est comprise entre 10 et 20%, ce qui montre que le schéma de Gibrat-Gauss peut être considéré comme très acceptable puisque le seuil de signification est généralement pris égal à 5%.

Pour la loi de Goodrich, on trouve $\chi^2 = 9,33$ pour 5 degrés de liberté, soit une probabilité de dépassement voisine de 10%.

Pour la loi III de Pearson, $\chi^2 = 8,44$ avec 6 degrés de liberté : probabilité voisine de 20%.

En conclusion, ces trois lois de probabilités peuvent être retenues pour représenter la distribution statistique des crues à KOULIKORO.

5 - Comparaisons et critiques

Nous rappelons ci-dessous les résultats trouvés pour les crues décennales, centenaires et millénaires, exprimées en m³/s.

	Goodrich	Gibrat-Gauss	Pearson III
Crue décennale	7.900	7.850	7.800
Crue centenaire	9.600	9.600	9.500
Crue millénaire	10.900	11.000	10.800

Les trois lois étudiées donnent donc sensiblement les mêmes résultats, l'écart de 200 m³/s trouvé entre les lois de Gibrat-Gauss et de Pearson pour la crue millénaire n'étant pas significatif.

Les points représentatifs de ces crues figurent sur le graphique 14, à abscisses gaussiennes, ainsi que les courbes correspondant aux lois théoriques établies. On remarque sur ce graphique que les points relatifs aux débits les plus élevés (maxima de 1924 et 1925) sont situés assez nettement au-dessus des courbes de fréquences. Cela n'infirme pas en soi la validité des schémas théoriques adoptés, mais par contre certaines circonstances nous permettent de mettre en doute la validité de ces débits.

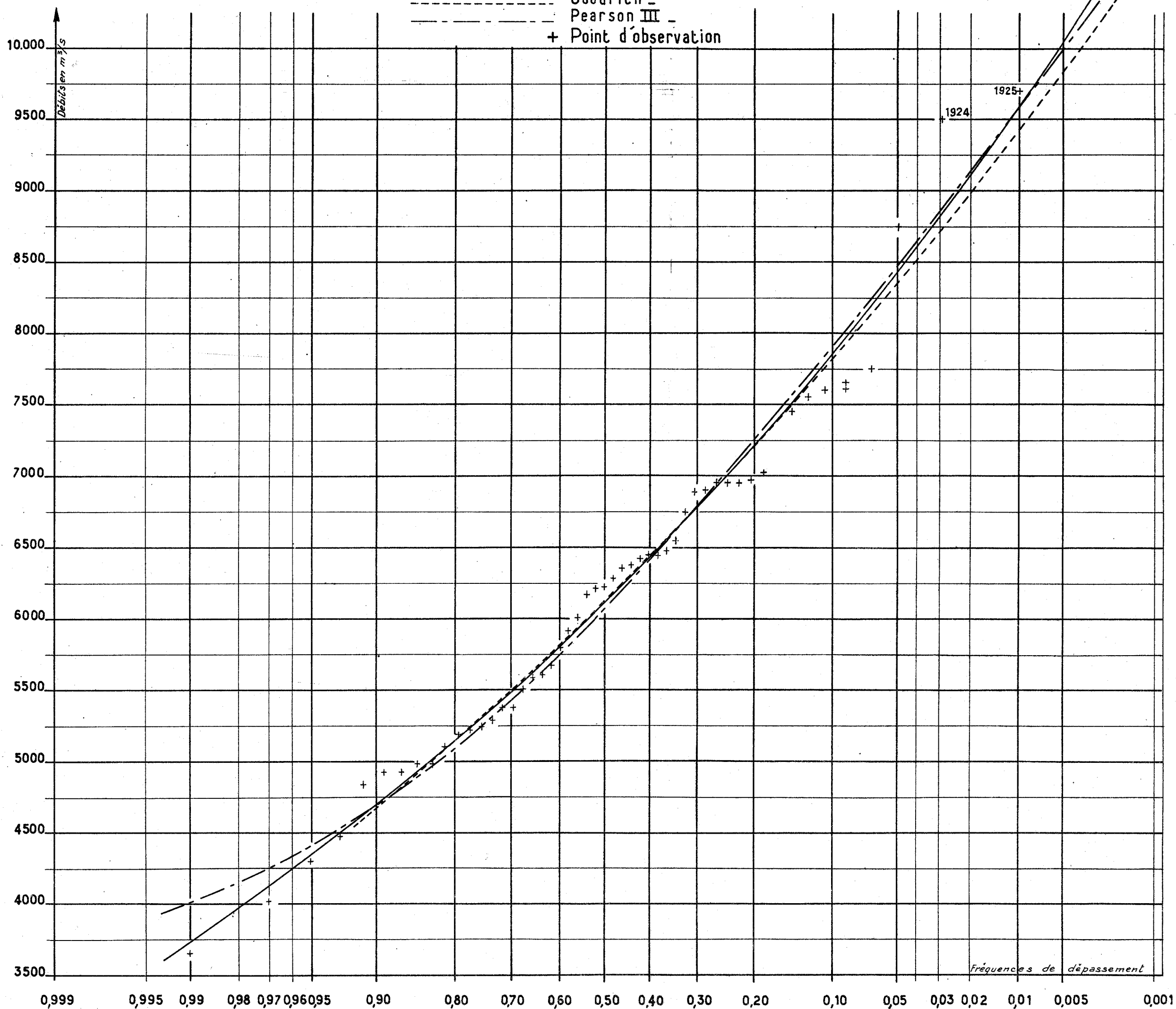
a- Le haut de l'échelle inclinée de KOULIKORO s'arrêtait en 1924 à la cote relative de 7,66 m. On peut se demander comment ont été faites les observations permettant de repérer le maximum : 8,25 m , d'au-

NIGER à KOULIKORO

DISTRIBUTION STATISTIQUE DES MAXIMA ANNUELS

Gr. 14

——— Gibrat - Gauss _
 - - - - - Goodrich _
 - - - - - Pearson III _
 + Point d'observation



NIG-8284

tant plus que l'inclinaison de la pile sur lequel était installée l'échelle, négligeable jusqu'à la cote 7,66 m, dépassait ensuite 30 degrés.

b- La crue de 1925 à KOUROUSSA a été inférieure à celle de 1955, alors que, si on retient pour KOULIKORO le chiffre suspect, la crue de 1925 à cette dernière station aurait été supérieure de $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$ à celle de 1955.

c- A KIRANGO, la crue de 1925 n'est supérieure que de $850 \text{ m}^3/\text{s}$ à celle de 1955. Pour KOULIKORO, nous venons de voir que la différence aurait été de $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$. Le laminage entre KOULIKORO et KIRANGO étant, pour les fortes crues récentes, de l'ordre de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, la crue de 1925 à KOULIKORO devrait être d'environ 8.500 à $8.600 \text{ m}^3/\text{s}$.

d- A DIRE, la crue 1925 est du même ordre que celle de 1955.

e- L'étude des corrélations entre lames d'eau écoulées et précipitations moyennes sur le bassin indique que les débits de 1925 et 1926 seraient surestimés.

Par prudence, nous garderons néanmoins les valeurs déduites des observations. La correction que nous pourrions raisonnablement effectuer ne changerait du reste pas grand chose aux lois théoriques établies précédemment.

En conclusion, nous adopterons les chiffres suivants :

Crue décennale	$7.900 \text{ m}^3/\text{s}$
Crue centenaire	$9.600 \text{ m}^3/\text{s}$
Crue millénaire	$11.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Ces chiffres sont nettement inférieurs à ceux admis jusqu'ici sans études statistiques très approfondies et qui, eux, tenaient compte des valeurs excessives des crues de 1924 et 1925. La crue centenaire était par exemple estimée à $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$ au lieu de 9.600

III - ETUDE DES CRUES SUR LES AUTRES STATIONS DU NIGER SUPERIEUR ET DE SES AFFLUENTS

Nous avons indiqué, au début de ce chapitre, l'impossibilité d'utiliser directement les observations pluviométriques pour l'extension des résultats hydrologiques en vue de l'étude statistique des crues. Cette extension est cependant indispensable pour la plupart des stations, par suite de la brièveté des périodes d'observations directes.

Lorsque le bassin est d'une certaine étendue, il existe une forte corrélation entre maxima annuels et modules. Le graphique 15 montre ce qu'il en est pour le NIGER à KOULIKORO. Des graphiques analogues ont été établis pour toutes les stations du NIGER Supérieur et du BANI. L'examen de ces graphiques montre qu'on peut, même sans faire l'étude des coefficients de corrélations, tenter d'appliquer ces corrélations jusqu'à des bassins de 12.000 km² environ.

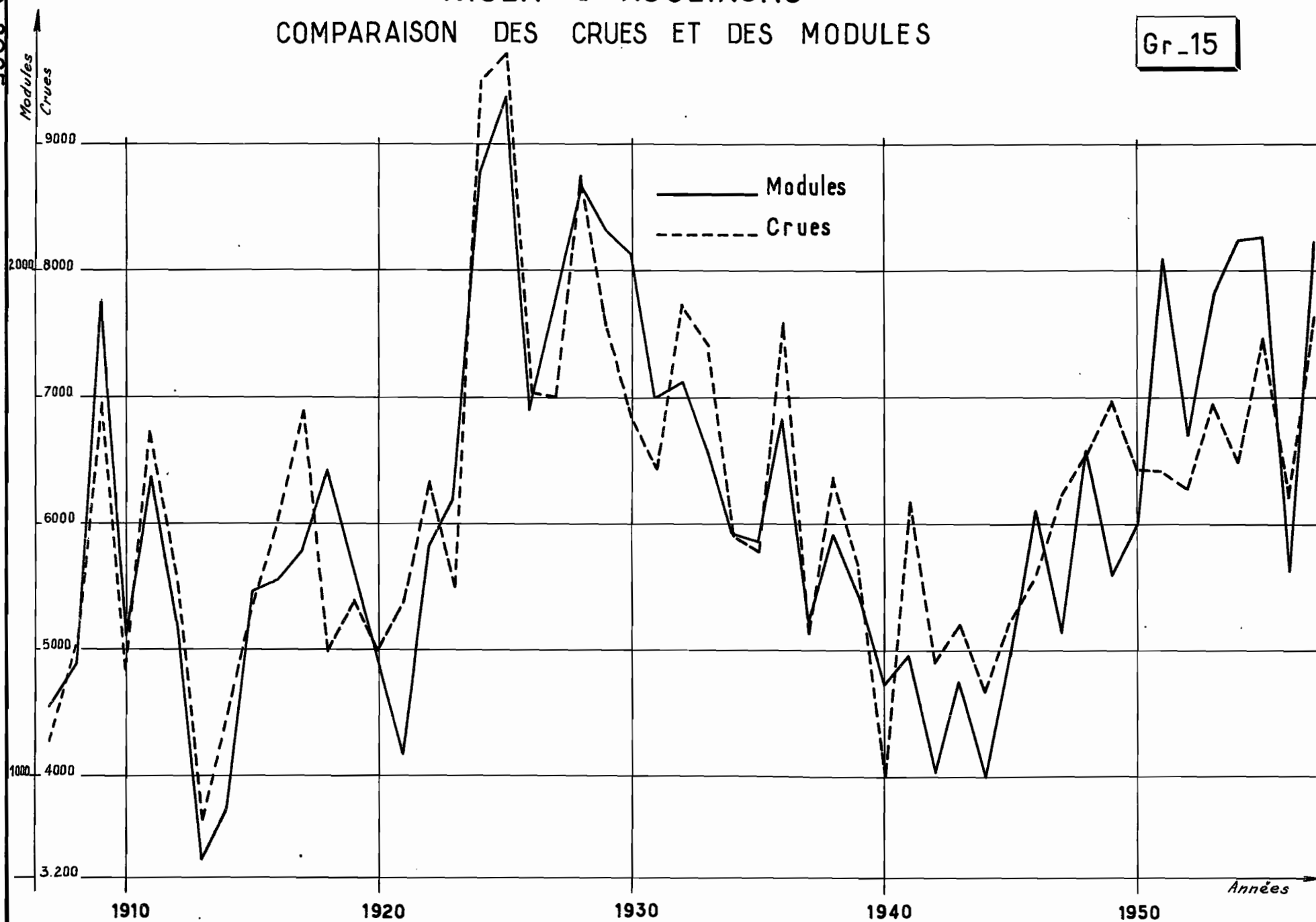
L'étude peut donc être envisagée jusqu'au NIANDAN à BARO inclusivement, mais le MILO à KANKAN en est exclu. Heureusement, on possède pour cette station un échantillonnage de crues peut être pas tout à fait suffisant pour une étude statistique précise des crues exceptionnelles, mais qui permet de dégrossir sérieusement le problème avec un pourcentage de chances au moins égal à celui des stations susceptibles de fournir des corrélations crues-modules acceptables mais pour lesquelles on ne possède que 5 ou 6 ans de relevés.

Ceci étant posé, et étant donné que nous avons déjà établi la répartition statistique des modules, il est clair que la connaissance des corrélations crues-modules nous fournira immédiatement la répartition statistique des crues. L'étude des crues à la station de KOULIKORO nous a conduits à trois types de lois de probabilités également acceptables. On peut estimer que les crues des cours d'eau drainant des bassins de surfaces supérieures à 12.000 km² suivront des lois analogues. Puisqu'on a le choix, il est préférable de choisir la forme analytique qui facilitera le plus les calculs, c'est-à-dire le schéma de Gibrat-Gauss. En effet, l'utilisation de cette loi

NIGER à KOULIKORO

COMPARAISON DES CRUES ET DES MODULES

Gr_15



conduit à admettre, puisque les modules ont une répartition gaussienne, une courbe de régression de forme logarithmique entre crues et modules et le passage de la répartition des modules à celle des crues se fera par un simple changement de variable.

Soit q le module d'une année donnée à une station donnée et Q le débit de crue concomitant.

On a établi au chapitre des modules que $z = \frac{q - \bar{q}}{\sqrt{2} \sigma}$

suit la loi de probabilité $\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2} dz$.

Pour que Q suive une loi de Gibrat-Gauss et soit en corrélation avec q , il faut et il suffit que l'on puisse écrire la relation :

$$z = \frac{q - \bar{q}}{\sqrt{2} \sigma} = a \log (Q - Q_0) + b$$

L'ajustement des paramètres a , Q_0 et b a été fait graphiquement. Il serait illusoire, dans ce cas particulier, de vouloir le parfaire par une méthode plus précise. Pour chaque station on porte en abscisse le module q de chaque année observée et en ordonnée le $\log Q$ correspondant. L'ajustement est fait en faisant varier Q_0 et en calculant chaque fois $\log (Q - Q_0)$ jusqu'à ce que les points correspondants soient sensiblement alignés sur le graphique. On trace alors une droite passant à travers les points de façon à répartir les écarts. Soit deux points de la droite correspondant à des couples (q_1, Q_1) et (q_2, Q_2) , on a :

$$z_1 = \frac{q_1 - \bar{q}}{\sqrt{2} \sigma} = a \log (Q_1 - Q_0) + b$$

$$z_2 = \frac{q_2 - \bar{q}}{\sqrt{2} \sigma} = a \log (Q_2 - Q_0) + b$$

d'où :

$$a = \frac{z_2 - z_1}{\log (Q_2 - Q_0) - \log (Q_1 - Q_0)}$$

$$b = z_2 - a \log (Q_2 - Q_0)$$

Les remarques précédentes sont valables également pour le bassin du BANI.

Nous donnons ci-dessous les résultats bruts trouvés pour les stations du NIGER Supérieur et de ses affluents :

NIGER à KOUROUSSA

$$z = \frac{q - 241}{81,02} = 7,052 \log Q - 21,366$$

crue décennale 1.440 m³/s

crue centenaire 1.830 m³/s

crue millénaire 2.190 m³/s

NIGER à DIALAKORO

$$z = \frac{q - 1.180}{328} = 5,419 \log (Q - 2.500) - 17,551$$

crue décennale 5.074 m³/s

crue centenaire 5.990 m³/s

crue millénaire 6.900 m³/s

NIANDAN à BARO

$$z = \frac{q - 260}{84,13} = 5,728 \log (Q - 350) - 16,322$$

crue décennale	1.370 m ³ /s
crue centenaire	1.720 m ³ /s
crue millénaire	2.060 m ³ /s

MILO à KANKAN

L'étude, faite directement à partir de l'échantillon des crues observées, est schématisée sur le graphique 16. Etant donné la faible importance de l'échantillon, aucun ajustement n'a été effectué et nous nous sommes contentés d'extrapoler graphiquement une courbe de répartition estimée "prudente". On a obtenu ainsi :

crue décennale	1.090 m ³ /s
crue centenaire	1.280 m ³ /s
crue millénaire	1.420 m ³ /s

SANKARANI à MANDIANA

$$z = \frac{q - 303}{85,69} = 16,222 \log Q - 49,226$$

crue décennale	1.230 m ³ /s
crue centenaire	1.370 m ³ /s
crue millénaire	1.480 m ³ /s

SANKARANI à GOUALA

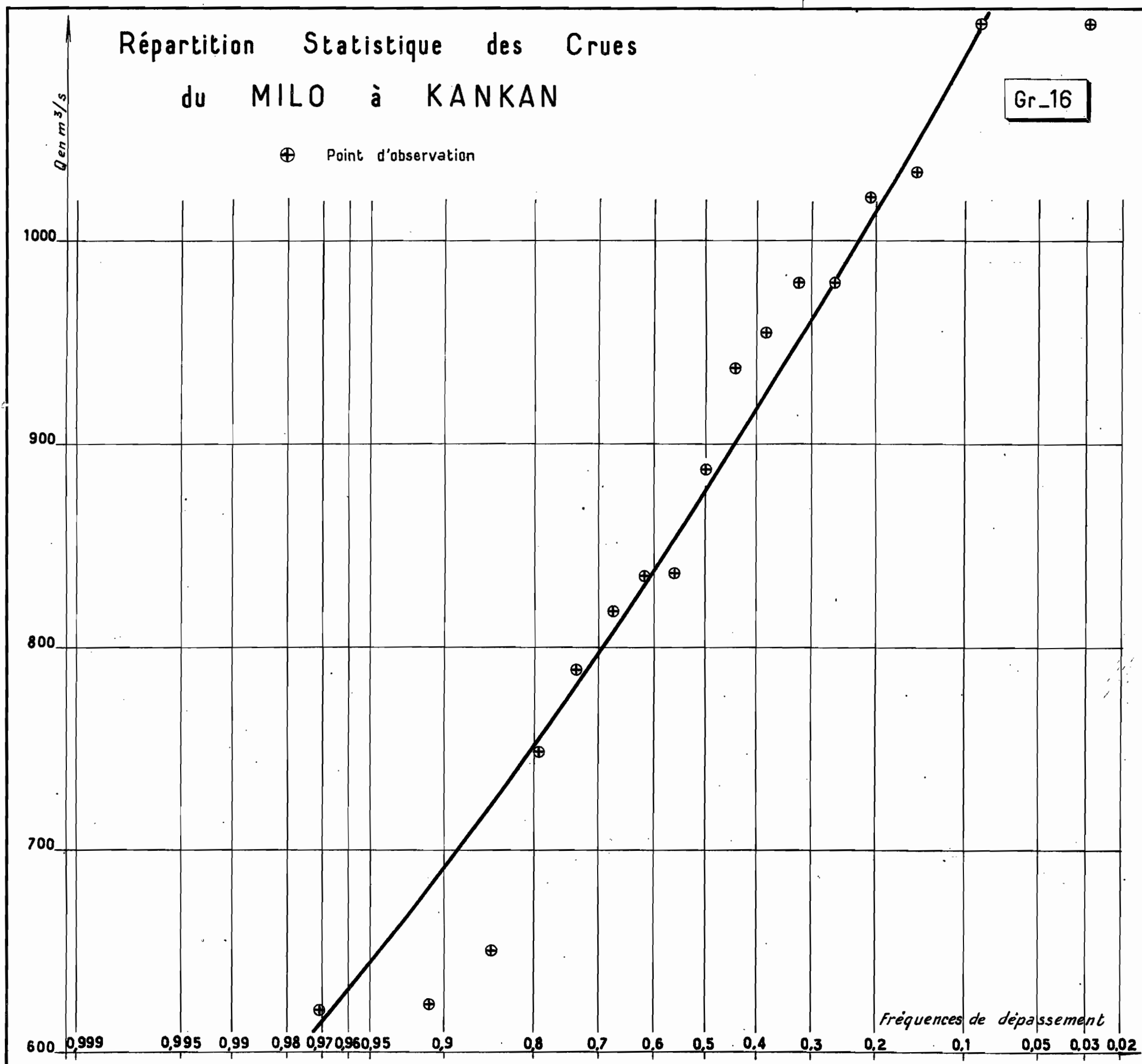
$$z = \frac{q - 402}{115,67} = 1,958 \log (Q - 1.300) - 4,506$$

crue décennale	1.890 m ³ /s
crue centenaire	2.690 m ³ /s
crue millénaire	3.940 m ³ /s

Répartition Statistique des Crues du MILO à KANKAN

Gr_16

⊕ Point d'observation



Les résultats ainsi obtenus sont loin d'être équivalents du point de vue précision. Aussi avons-nous jugé utile de donner sur le tableau XV qui les rassemble, un certain nombre d'appréciations qualitatives à ce sujet. C'est ainsi que les crues millénaires trouvées par le calcul pour le SANKARANI n'ont strictement aucune valeur : les estimations de crues centennaires y sont déjà très grossières. Les chiffres bruts ont été arrondis et parfois légèrement retouchés.

Par contre, nous avons ajouté quelques ordres de grandeurs de crues décennales pour des stations observées depuis très peu de temps. Ces estimations sont justifiées par la remarque suivante : toutes les crues décennales calculées aux différentes stations présentant une période d'observations de quelque durée, ont été dépassées au moins une fois en 1955 ou 1957. Il est donc assez probable qu'en prenant comme crue décennale pour les stations observées depuis peu un chiffre légèrement supérieur à celui de la plus forte crue observée, on donne une estimation par excès, donc du point de vue pratique, dans le sens de la sécurité.

IV - ETUDE DES CRUES DANS LE BASSIN DU BANI

Nous utiliserons la méthode exposée ci-dessus au paragraphe III pour les stations comportant au moins 5 ans d'observations.

BAOULE à DIOILA

$$z = \frac{q - 204}{79,18} = 1,480 \log (Q - 700) - 3,1684$$

crue décennale 1.270 m³/s

crue centenaire 2.490 m³/s

BANI à DOUNA

$$z = \frac{q - 668}{164} = 4,328 \log (Q - 2.000) - 12,150$$

TABLEAU XV
BASSIN DU NIGER SUPERIEUR

Etude des crues - Eléments statistiques

Stations	Crues maximales observées:Crues décennales:Crues centenaires:Crues millénaires:									
	Durée	Année	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits
	de la	d'ob-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-
	pério:	serva:	m ³ /s	l/s.km ²	m ³ /s	l/s.km ²	m ³ /s	l/s.km ²	m ³ /s	l/s.km ²
	de	tion								
(ans)										
NIGER à FARANAH 3.180 km ²	3	1957:	297	93,5	((300))	((95))				
NIGER à KOUROUSSA 1.800 km ²	15	1955:	1.710	95	1.440	80	(1.850)	(103)	(2.200)	(122)
NIGER à DIALAKORO 71.000 km ²	6	1955:	5.370	75,5	5.070	71,5	(6.000)	(85)	((6.900))	((99))
NIGER à KOULIKORO 120.000 km ²	51	1925:	9.700 ⁽¹⁾	81 ?	7.900	66	9.600	80	11.000	92
NIANDAN à BARO 12.600 km ²	12	1955:	1.490	118	1.370	109	(1.720)	(136)	(2.050)	(163)
MILO à KONSANKORO 1.000 km ²	3	1957:	276	276	((300))	((300))				
MILO à KANKAN 9.900 km ²	17	1939&: 1944	1.106 ⁽²⁾	112	1.090	110	(1.300)	(131)	(1.450)	(146)
SANKARANI à MANDIANA 21.900 km ²	4	1957:	1.334	61	(1.250)	(57)	((1.400))	((64))		
SANKARANI à GOUALA 35.300 km ²	4	1957:	2.140	60,5	(1.900)	(54)	((2.700))	((76))		
TINKISSO à TINKISSO 6.400 km ²	3	1957:	315	48,3	((350))	((55))				

(1) 7.456 m³/s en 1955 et 7.640 m³/s en 1957. La valeur de 1925 est surestimée.
(2) 1.034 m³/s en 1955 (Troisième maximum observé)

Parenthèses : estimations très incertaines
Doubles parenthèses : ordres de grandeur.

crue décennale	3.040 m ³ /s
crue centenaire	3.550 m ³ /s
crue millénaire	4.060 m ³ /s

BANI à BENENY-KEGNY

$$z = \frac{q - 682}{194} = 1,8098 \log (Q - 2.200) - 4,4951$$

crue décennale	3.174 m ³ /s
crue centenaire	4.680 m ³ /s

BANI à SOFARA

$$z = \frac{q - 512}{94,3} = 24,234 \log Q - 76,8457$$

crue décennale	1.620 m ³ /s
crue centenaire	1.730 m ³ /s

Ces valeurs, arrondies et parfois retouchées pour tenir compte des tendances générales du cours d'eau, sont portées sur le tableau XVI avec les mêmes indications que pour le NIGER Supérieur.

V - GENERALISATION DES RESULTATS

Nous allons tenter maintenant de prévoir les crues correspondant à une fréquence donnée pour un bassin de superficie quelconque. L'étude qui suit a été basée sur les crues décennales, les mieux connues. Nous indiquerons ensuite, en prenant pour exemple le cours supérieur du NIGER jusqu'à KOULIKORO, comment on peut estimer les valeurs correspondant à des fréquences plus rares.

TABLEAU XVI

BASSIN DU BANI

Etude des crues - Eléments statistiques

Stations	Crues maximales observées:Crues décennalesCrues centenaires:Crues millénaires:									
	Durée	Année	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits	Débits
	de la	d'ob-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-	spéci-
	pério:	serva:	figues:	figues:	figues:	figues:	figues:	figues:	figues:	figues:
	(ans)	tion	m ³ /s	l/s.km ²	m ³ /s	l/s.km ²	m ³ /s	l/s.km ²	m ³ /s	l/s.km ²
BAOULE à BOUGOUNI 15.700 km ²	2	1957	891	57	((900))	((57))				
BAOULE à DIOILA 32.500 km ²	5	1953	1.580	49	((1.270))	((39))	((2.500))	((77))		
BAGOE à PANKOUROU 31.800 km ²	2	1957	1.398	44	((1.400))	((44))				
BANI à DOUNA 101.600 km ²	8	1954	3.439	33,9	3.040	30	(3.600)	(36)	((4.100))	((41))
BANI à BEN. KEGNY 116.000 km ²	5	1953	4.032 ⁽¹⁾	34,8	(3.200)	(28)	((4.500))	((39))		
BANI à SOFARA 129.400 km ²	5	1953	1.644 ⁽²⁾	12,7	((1.620))	((12,5))	((1.750))	((13,5))		

(1) 3.570 m³/s en 1954 (second maximum observé)

(2) 1.640 m³/s en 1954 (second maximum observé)

Parentèses : estimations très incertaines
Doubles parentèses : ordres de grandeur.

1 - Extension des résultats à une superficie de bassin quelconque

Nous nous limiterons d'abord aux bassins supérieurs à 3.000 km² pour lesquels des éléments nous sont fournis par les stations étudiées dans cette monographie. Puis nous ferons intervenir, pour les bassins plus petits, les ordres de grandeurs dégagés par les études sur bassins expérimentaux.

De nombreux auteurs admettent que, toutes choses égales d'ailleurs, le débit de crue d'un cours d'eau correspondant à une fréquence donnée croît en fonction de la superficie (S), d'après la relation :

$$Q = A S^n$$

En adoptant une représentation logarithmique, l'équation précédente peut se mettre sous la forme :

$$\log Q = \log A + n \log S$$

c'est-à-dire que la courbe Q (S) doit être une droite en coordonnées logarithmiques si la loi est vérifiée. Sur le graphique 17 on a porté dans un tel système les débits de crues décennales des différentes stations étudiées, en fonction de la superficie du bassin correspondant.

On remarque que :

- les 4 stations du NIGER Supérieur (FARANAH, KOUROUSSA, DIALAKORO et KOULIKORO) sont représentées par des points parfaitement alignés.

- l'alignement est acceptable pour les stations du BANI jusqu'à DOUNA. Seul le BAOULE à DIOILA est assez aberrant.

- les points relatifs au MILO à KANKAN et au NIAN DAN à BARO, d'une part, aux deux stations du SANKARANI, d'autre part, sont sensiblement situés sur des parallèles à la droite correspondant au NIGER Supérieur. On peut supposer, bien que n'ayant aucun recoupement, que le TINKISSO n'échappe pas à cette règle.

On obtient ainsi un groupement par régions géographiques qui ne nous est pas étranger : il a déjà

NIG-8293

ED:

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

LE: 17-4-59

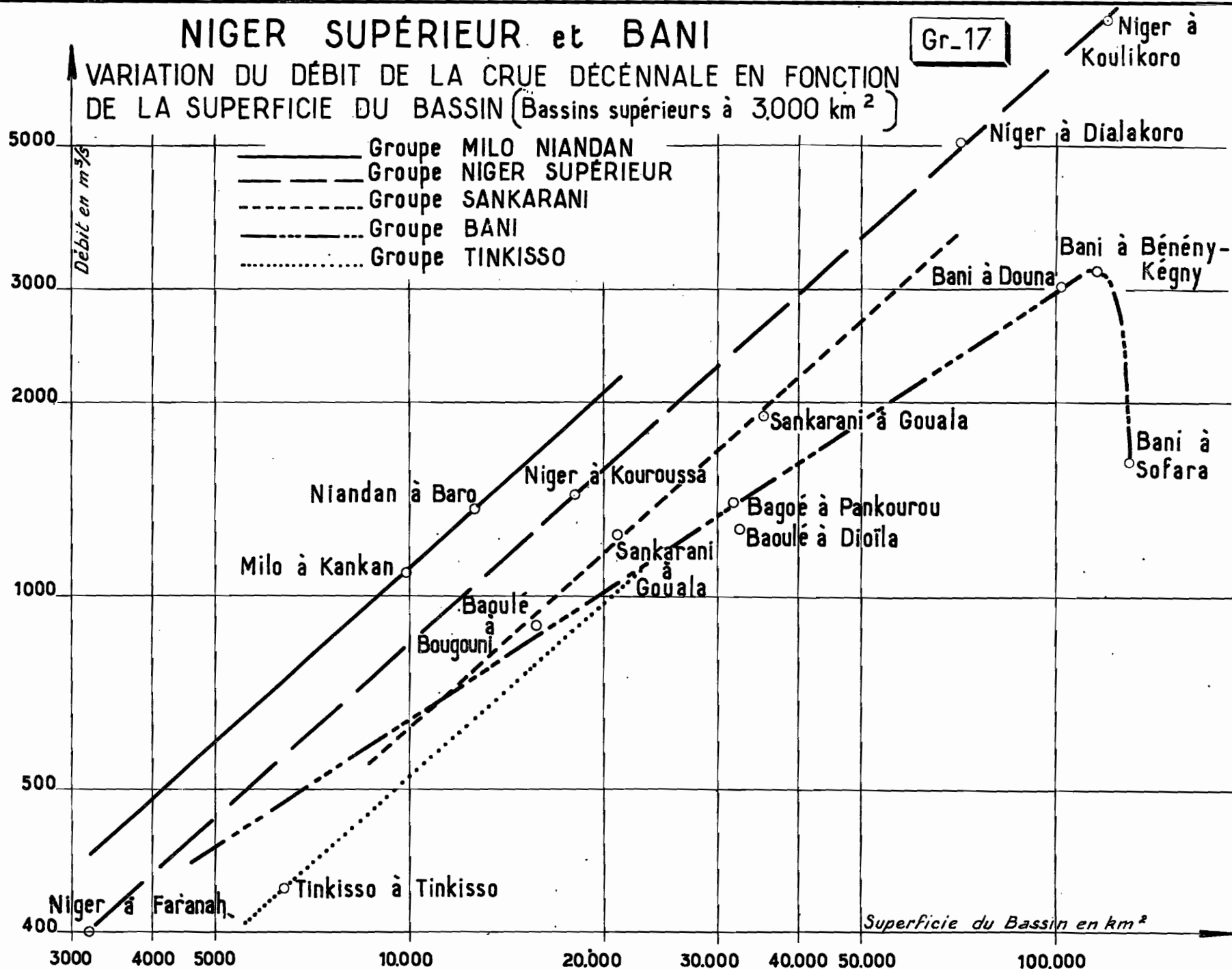
DES: J. Mélayet

VISA:

AO

NIGER SUPÉRIEUR et BANI

VARIATION DU DÉBIT DE LA CRUE DÉCÉNNALE EN FONCTION DE LA SUPERFICIE DU BASSIN (Bassins supérieurs à 3.000 km²)



été observé à propos des modules. Comme pour les modules on observe une anomalie sur le BANI Inférieur due aux pertes par évaporation et au très fort laminage. La détermination des paramètres n et A a été faite d'après les droites du graphique 17. On trouve :

Groupe MILO NIANDAN :

$$\log Q = - 0,576 + 0,906 \log S$$

$$\text{ou } Q = 0,265 S^{0,906}$$

Groupe NIGER Supérieur

$$\log Q = - 0,700 + 0,906 \log S$$

$$\text{ou } Q = 0,200 S^{0,906}$$

Groupe SANKARANI

$$\log Q = - 0,830 + 0,906 \log S$$

$$\text{ou } Q = 0,148 S^{0,906}$$

Groupe TINKISSO

$$\log Q = - 0,900 + 0,906 \log S$$

$$\text{ou } Q = 0,126 S^{0,906}$$

Groupe BANI (jusqu'à DOUNA)

$$\log Q = 0,121 + 0,671 \log S$$

$$\text{ou } Q = 1,32 S^{0,671}$$

L'interprétation physique de A et de n ne peut pas donner lieu, dans un ouvrage d'application de ce genre, à une étude systématique dont les conclusions risqueraient d'être illusoires. Notons simplement que n étant constant (sauf pour le BANI), il semble que A varie dans le même sens que la pente des profils en long et, par conséquent, en sens inverse du développement des plaines d'inondation, lesquelles contribuent à laminier la crue de l'amont vers l'aval.

Parmi les petits bassins expérimentaux, on a obtenu par les méthodes analytiques, comme valeurs de crues décennales :

- Pour le DOUNFING, près de BANIAGO, $30 \text{ m}^3/\text{s}$ environ pour $17,5 \text{ km}^2$

- Pour le bassin de TIEMORO près de KANKAN, $50 \text{ m}^3/\text{s}$ environ pour 50 km^2 environ.

Si l'on ajoute la crue décennale qui a été estimée à $300 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le MILO à KONSANKORO (1.000 km^2), on obtient sensiblement une droite sur le graphique 18, établi en coordonnées logarithmiques. L'équation de cette droite serait :

$$\log Q = 0,744 + 0,578 \log S$$

Ces résultats semblent indiquer que, pour de petits bassins, la situation géographique intervient peu dans le calcul des crues décennales, à condition évidemment de rester dans le même type de climat. Ce fait, pressenti par de nombreux spécialistes d'hydrologie tropicale, s'explique par la genèse des crues : dans le cas d'un très petit bassin, inférieur à 30 km^2 pour fixer les idées, une crue exceptionnelle est due à une averse exceptionnelle en intensité, chaque averse couvrant pratiquement la totalité du bassin. La crue en question dépend bien aussi, pour une large part, de la position de l'épicentre de l'averse dans le bassin et de l'état de saturation préalable du sol, mais ce sont là des facteurs qui varient suffisamment "au hasard" pour que leur influence n'apparaisse pas sur une série assez longue d'observations.

Les caractéristiques de la crue dépendent donc de la forme type du hyétogramme de la pluie exceptionnelle qui reste le même pour un même climat.

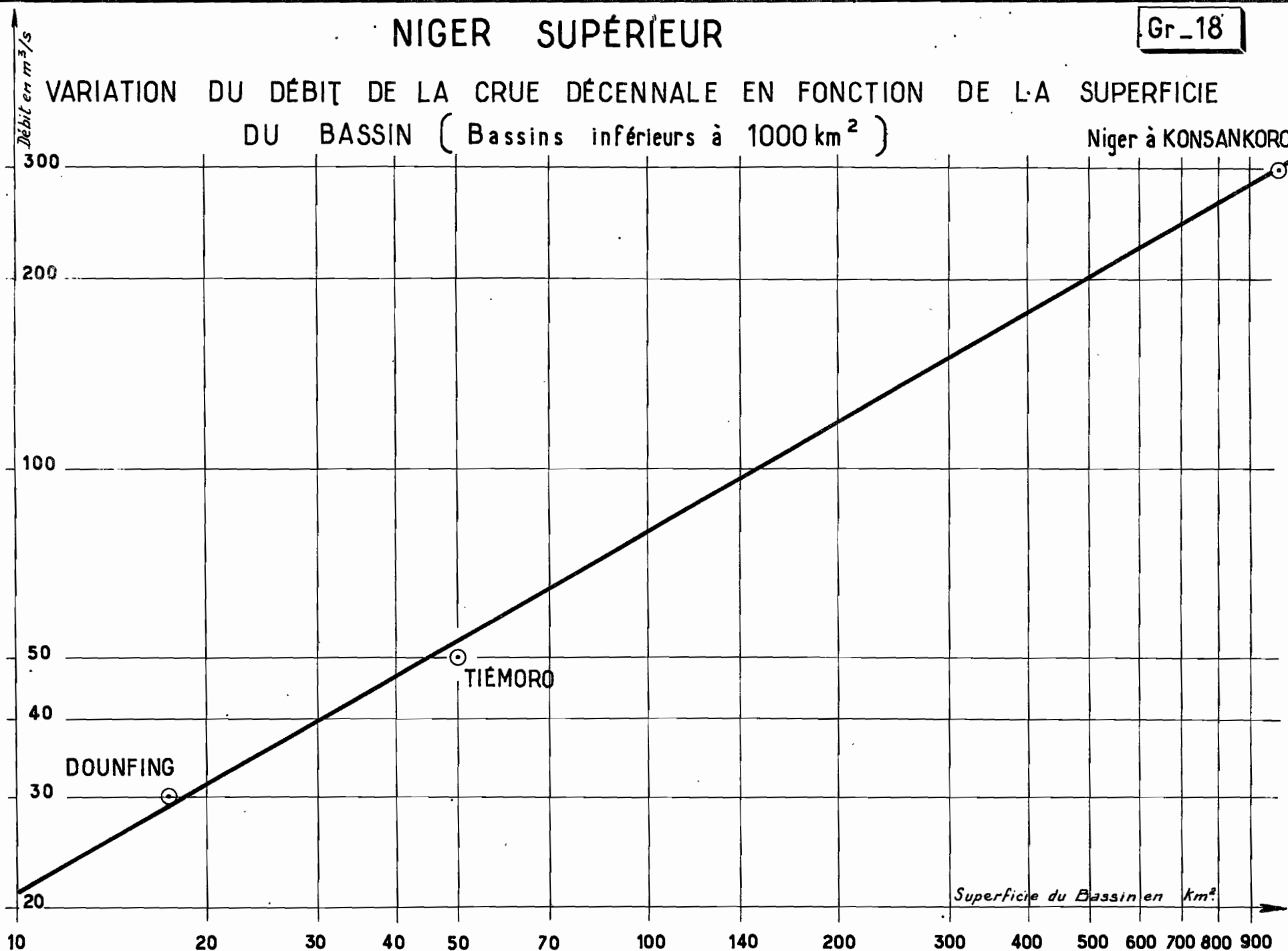
A mesure que la grandeur du bassin s'accroît, chaque averse intéresse une fraction de plus en plus faible de sa superficie. La distribution des averses dans l'espace et dans le temps prend de plus en plus d'importance et, à la limite, le maximum de crue arrive à ne plus dépendre que de la hauteur annuelle de précipitations prise avec sa distribution statistique dans le temps et dans l'espace. C'est ce qui explique, en

NIGER SUPÉRIEUR

Gr_18

VARIATION DU DÉBIT DE LA CRUE DÉCENNALE EN FONCTION DE LA SUPERFICIE
DU BASSIN (Bassins inférieurs à 1000 km^2)

Niger à KONSANKORO



particulier, que l'on puisse trouver pour de grands bassins, une corrélation assez serrée entre les modules et les maxima annuels.

Il semble que la limite supérieure des superficies pour lesquelles on peut considérer que la situation géographique n'intervient pas pour la détermination des crues exceptionnelles, soit comprise entre 500 et 1.000 km².

Il serait dangereux, toutefois, de généraliser sans précautions. On commettrait sans doute une erreur grossière en appliquant ce mode de calcul aux petits cours d'eau de GUINEE forestière où, si les fortes intensités n'ont peut-être pas des valeurs beaucoup plus élevées que plus au nord ou plus à l'est, elles sont par contre beaucoup plus fréquentes. A ce point de vue, le bassin du MILO à KONSANKORO remplirait tout juste des conditions acceptables d'extrapolation.

Cette réserve étant faite, la relation Q (S) pour le NIGER Supérieur se présente comme une courbe unique de 0 à 500 km² environ, puis, au delà, comme un faisceau dont chaque branche correspond à des régions géographiques plus ou moins homogènes.

2 - Débits spécifiques des crues décennales

Il nous a paru plus commode, pour l'utilisateur, de présenter les résultats définitifs, pour des superficies de 10 km² à 120.000 km², en débits spécifiques de crues. Les relations établies plus haut deviennent alors, q désignant le débit spécifique de crue décennale exprimé en l/s.km² :

Groupe MILO-NIANDAN :

$$\log \frac{q}{1.000} = - 0,576 - 0,094 \log S$$

Groupe NIGER Supérieur :

$$\log \frac{q}{1.000} = - 0,700 - 0,094 \log S$$

Groupe SANKARANI :

$$\log \frac{q}{1.000} = - 0,830 - 0,094 \log S$$

Groupe BANI (jusqu'à DOUNA)

$$\log \frac{q}{1.000} = 0,121 - 0,329 \log S$$

L'allure générale de la relation q (S) est présentée sur le graphique 19. L'échelle des abscisses est logarithmique par raison de commodité. Ce graphique étant pratiquement inutilisable pour les bassins supérieurs à 2.000 km², nous avons établi, à une autre échelle, le graphique 20.

3 - Extension à des fréquences non décennales

Nous prendrons comme exemple le cours du NIGER Supérieur de KOUROUSSA à KOULIKORO, dont le bassin correspondant varie de 18.000 à 120.000 km².

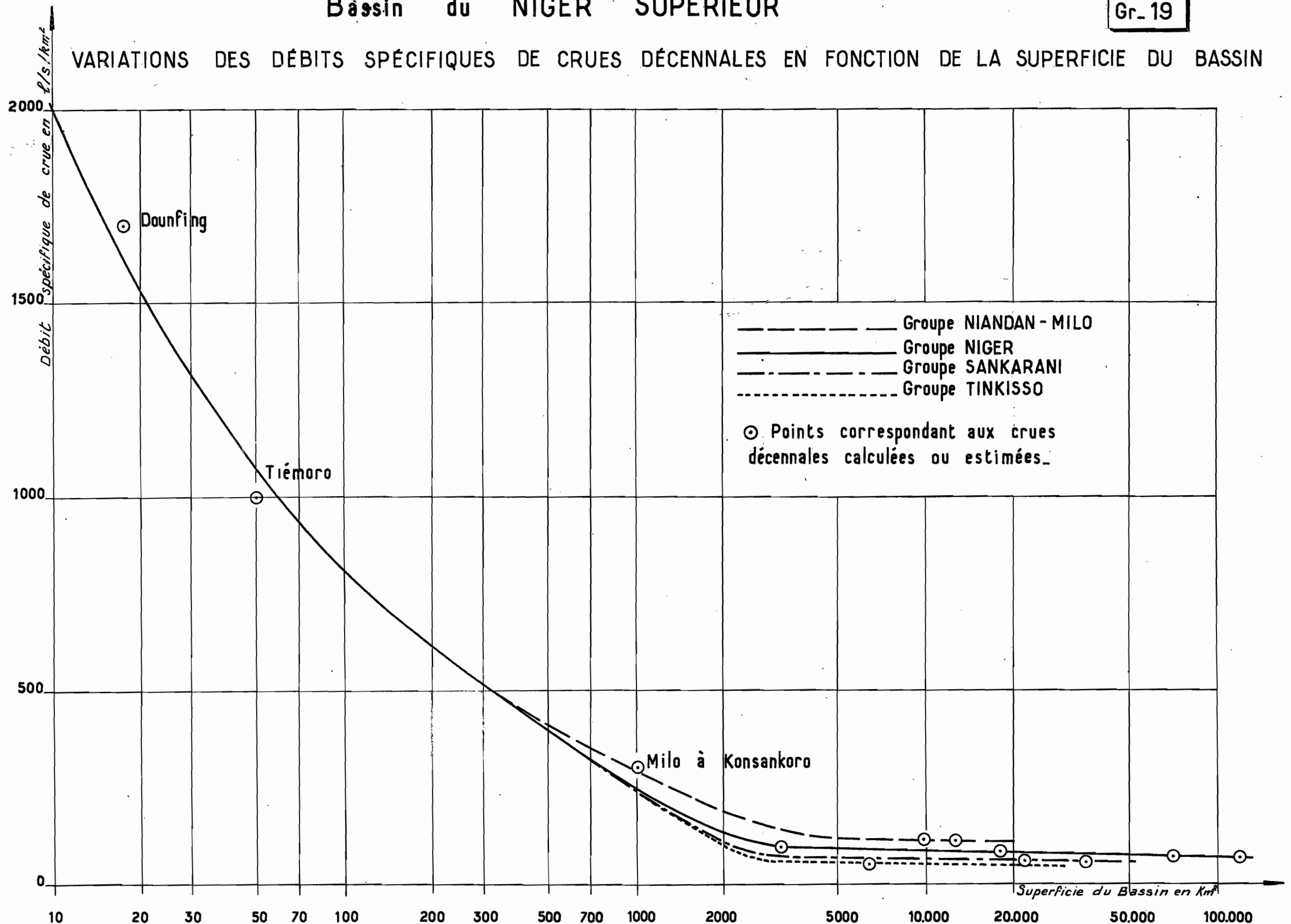
Le calcul des crues a été fait pour les fréquences quinquennale, décennale, didécennale, cinquantenaire, centenaire et millénaire. Les résultats sont groupés dans le tableau suivant :

Station	Surface du bassin km ²	Fréquence	Débit m ³ /s
NIGER à KOUROUSSA	18.000	Quinquennale	1.300
		Décennale	1.440
		Didécennale	1.560
		Cinquantenaire	1.720
		Centenaire	1.850
		Millénaire	2.200
NIGER à DIALAKORO	71.000	Quinquennale	4.740
		Décennale	5.070
		Didécennale	5.360
		Cinquantenaire	5.750
		Centenaire	6.000
		Millénaire	6.900

Bassin du NIGER SUPÉRIEUR

Gr. 19

VARIATIONS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES DE CRUES DÉCENNALES EN FONCTION DE LA SUPERFICIE DU BASSIN



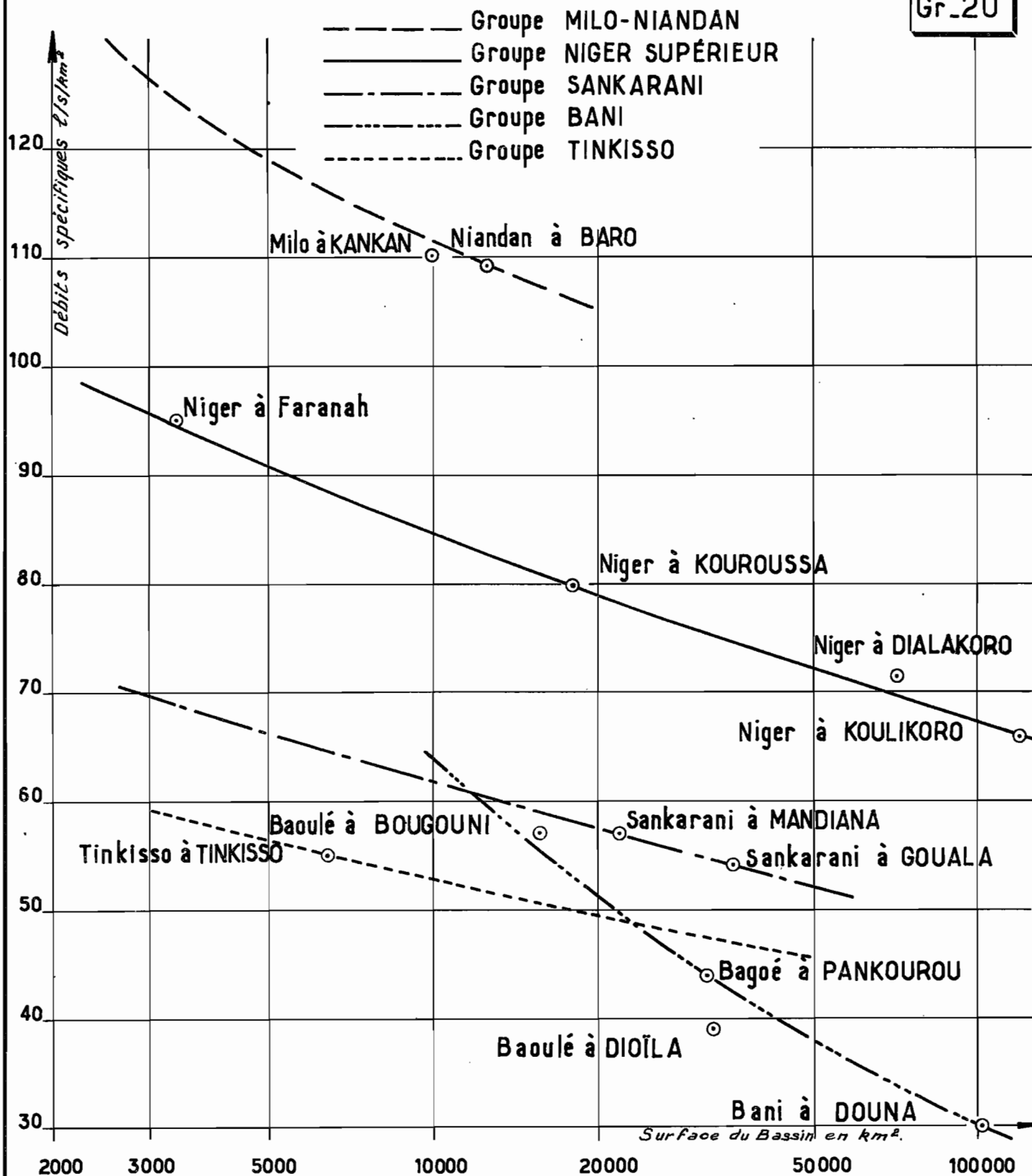
NIG_8289

le 8-4-59 J.M.

Bassin du NIGER SUPÉRIEUR et du BANI

VARIATIONS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES DE CRUES DÉCENNALES EN
FONCTION DE LA SUPERFICIE DU BASSIN

Gr. 20



NIG 8290

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED:

LE: 8-4-59

DES: J. Mélaye

VISA:

TUBE N°:

AO

Station	Surface du bassin km ²	Fréquence	Débit m ³ /s
NIGER à KOULIKORO	120.000	Quinquennale	7.250
		Décennale	7.900
		Didécennale	8.500
		Cinquantenaire	9.150
		Centenaire	9.600
		Millénaire	11.000

On a porté sur le graphique 21 les logarithmes des débits de crues en fonction du logarithme de la superficie des bassins. On constate que les courbes d'égale fréquence sont pratiquement des droites : elles forment un faisceau légèrement convergent.

Des faisceaux analogues pourraient être constitués pour les autres groupes géographiques avec toutefois une précision bien inférieure, surtout pour les fréquences rares. En ce qui concerne les petits bassins, il conviendra de se montrer particulièrement prudent.

NIG-8288

ED:

LE: 16-4-59

DES: J. Méliayer

VISA:

TUBE N°:

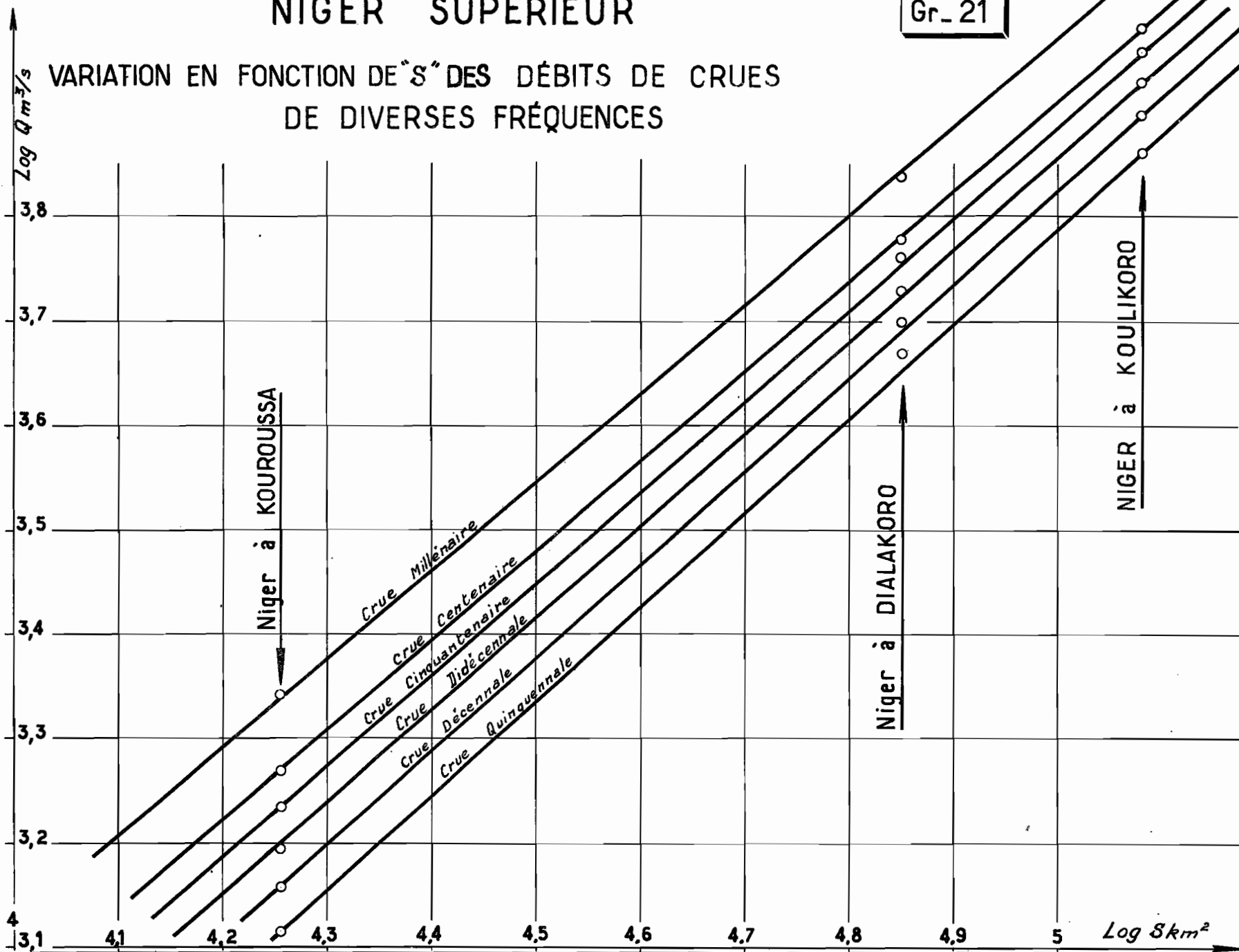
AO

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

NIGER SUPÉRIEUR

Gr. 21

VARIATION EN FONCTION DE "S" DES DÉBITS DE CRUES
DE DIVERSES FRÉQUENCES



C H A P I T R E I V

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT

On définit le déficit d'écoulement d'une période quelconque comme la différence entre le volume de pluie tombé sur le bassin et le volume d'eau écoulé à l'exutoire pendant la même période. C'est donc un des termes de l'équation du bilan hydrologique simplifiée à l'extrême. Si la période est choisie de façon absolument quelconque, rien ne s'oppose à ce que le déficit d'écoulement soit négatif.

En pratique, on considère toujours le déficit d'écoulement sur un cycle hydrologique plus ou moins complet, ce dernier terme se rapportant à une période au début et à la fin de laquelle on se trouve en présence d'un même état des réserves. Cette hypothèse n'est jamais parfaitement vérifiée mais on peut l'admettre avec une très bonne approximation si l'on considère par exemple le cycle annuel d'étiage à étiage. On peut même aller plus loin et se contenter dans ces régions boréales, d'un bilan établi sur l'année calendaire sans introduire d'erreurs notables, sauf peut-être pour le BANI Inférieur.

Si, de plus, on considère comme négligeables les pertes par infiltration profondes, ce qui semble bien être le cas des bassins étudiés dans cette monographie, le calcul du déficit d'écoulement constitue alors une estimation honnête de l'évapotranspiration réelle. Pour une durée de plusieurs années, le jeu du remplissage et de la vidange des réserves crée une compensation d'une année sur l'autre et le déficit calculé se rapproche d'autant plus de l'évapotranspiration réelle moyenne que la période est plus longue.

En pratique, le déficit est rapporté à la surface du bassin et mesuré en millimètres d'eau. On l'obtient par la relation :

$$D_{mm} = P_{mm} - H_{mm}$$

P est la pluviométrie moyenne sur le bassin pendant la période (une ou plusieurs années) et H la lame d'eau annuelle équivalente au débit moyen à la station pendant la même période.

Les tableaux suivants donnent les résultats relatifs aux stations du NIGER et du BANI pour chaque année des périodes d'observations ainsi que les déficits et pluviométries moyennes de ces périodes. Les coefficients d'écoulement $R = \frac{H}{P}$ figurent également sur ces tableaux.

Tableau XVII	NIGER à FARANAH NIGER à KOUROUSSA NIGER à DIALAKORO
Tableau XVIII	NIGER à KOULIKORO
Tableau XIX	NIANDAN à BARO MILO à KANKAN
Tableau XX	SANKARANI à MANDIANA SANKARANI à GOUALA TINKISSO à TINKISSO
Tableau XXI	BAOULE à BOUGOUNI BAOULE à DIOILA BAGOE à PANKOUROU
Tableau XXII	BANI à DOUNA BANI à BENENY-KEGNY BANI à SOFARA

On doit noter que la précision avec laquelle sont obtenues les valeurs moyennes du déficit d'écoulement est de l'ordre de 30 mm pour KOULIKORO, 50 mm pour la plupart des autres stations et plus pour certaines, telle que FARANAH.

Les valeurs moyennes obtenues se tiennent en général assez bien. Pour le NIGER Supérieur lui-même, les déficits moyens observés sont compris entre 1125 et 1165 mm pour les stations de FARANAH, DIALAKORO et KOULIKORO. Le déficit de 1288 mm qui apparaît à KOUROUSSA pourrait sembler erratique. En fait, il peut

TABLEAU XVII

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT

Année	Pluviométrie mm	Déficit mm	Coefficient d'écoulement %
<u>NIGER à FARANAH</u>			
1955	1 890	995	47,4
1956	1 710	1 184	30,8
1957	2 060	1 195	42,0
Moyenne	1 887	1 125	40,1
<u>NIGER à KOUROUSSA</u>			
1923	1 745	1 271	27,2
1945	1 755	1 386	21,0
1946	1 800	1 396	22,4
1947	1 385	1 069	22,8
1948	1 745	1 271	27,2
1949	1 630	1 244	23,7
1950	1 480	1 155	21,9
1951	2 000	1 438	28,1
1952	1 665	1 144	31,3
1954	2 105	1 622	22,9
1955	1 775	1 145	35,5
1956	1 585	1 253	20,9
1957	1 905	1 355	28,8
Moyenne	1 737	1 288	25,6
<u>NIGER à DIALAKORO</u>			
1952	1 590	1 073	32,6
1953	1 830	1 199	34,5
1954	1 955	1 298	33,6
1955	1 775	1 078	39,3
1956	1 560	1 093	30,0
1957	1 810	1 174	35,1
Moyenne	1 753	1 153	34,2

TABLEAU XVIII

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT

NIGER à KOULIKORO

Année	Pluviométrie mm	Déficit mm	Coefficient d'écoulement %
1923	1 550	1 142	26,3
1924	1 685	1 108	34,2
1925	1 740	1 123	35,5
1926	1 550	1 096	29,3
1927	1 685	1 173	30,4
1928	1 760	1 191	32,3
1929	1 700	1 153	32,2
1930	1 635	1 101	32,6
1931	1 630	1 170	28,2
1932	1 765	1 296	26,6
1933	1 765	1 333	24,5
1934	1 530	1 140	25,5
1935	1 450	1 065	26,6
1936	1 635	1 186	26,8
1937	1 560	1 217	22,0
1938	1 640	1 252	23,7
1939	1 450	1 093	24,6
1940	1 400	1 089	22,2
1941	1 460	1 135	22,3
1942	1 420	1 155	18,7
1943	1 520	1 207	20,6
1944	1 390	1 127	18,9
1945	1 565	1 239	20,8
1946	1 590	1 190	25,2
1947	1 490	1 152	22,7
1948	1 625	1 193	26,6
1949	1 585	1 217	23,2
1950	1 465	1 071	26,9
1951	1 735	1 187	31,6
1952	1 510	1 069	29,2
1953	1 735	1 220	29,7
1954	1 820	1 278	29,8
1955	1 610	1 067	33,7
1956	1 450	1 079	25,6
1957	1 750	1 209	30,9
Moyenne	1 596	1 164	26,9

TABLEAU XIX

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ECOULEMENT

Année	Pluviométrie mm	Déficit mm	Coefficient d'écoulement %
<u>NIANDAN à BARO</u>			
1947	1 970	1 420	27,9
1948	1 890	1 240	34,4
1949	2 070	1 611	22,2
1950	1 640	1 146	30,1
1951	2 200	1 335	39,3
1952	1 890	1 203	36,3
1953	2 180	1 387	36,4
1954	2 090	1 305	37,6
1955	2 130	1 232	42,2
1956	1 600	1 100	31,3
1957	2 030	1 220	40,0
Moyennes	1 972	1 291	34,3
<u>MILO à KANKAN</u>			
1938	2 010	1 360	32,3
1939	1 780	1 069	39,9
1940	1 710	1 100	35,7
1942	1 750	1 140	34,9
1943	1 755	1 100	37,3
1944	1 910	1 255	34,3
1947	2 105	1 490	29,2
1948	2 000	1 382	30,9
1949	1 970	1 332	32,4
1950	1 505	963	36,0
1951	1 975	1 073	45,7
1952	1 735	1 021	41,2
1953	1 965	1 244	36,7
1954	2 100	1 251	40,4
1955	1 908	1 041	45,5
1956	1 575	1 080	31,4
1957	1 960	1 259	35,7
Moyennes	1 865	1 186	36,4

TABLEAU XX

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ECOULEMENT

Année	Pluviométrie mm	Déficit mm	Coefficient d'écoulement %
<u>SANKARANI à MANDIANA</u>			
1954	1 875	1 315	29,8
1955	1 565	1 075	31,3
1956	1 375	1 016	26,1
1957	1 850	1 347	27,2
Moyenne	1 666	1 188	28,6
<u>SANKARANI à GOUALA</u>			
1954	1 775	1 356	23,6
1955	1 485	1 071	27,9
1956	1 355	1 061	21,7
1957	1 770	1 300	26,6
Moyenne	1 596	1 197	25,0
<u>TINKISSO à TINKISSO</u>			
1955	1 740	1 257	27,8
1956	1 525	1 104	27,6
1957	1 740	1 278	26,6
Moyenne	1 668	1 213	27,3

TABLEAU XXI

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT

Année	Pluviométrie mm	Déficit mm	Coefficient d'écoulement %
<u>BAOULE à BOUGOUNI</u>			
1956	1 355	1 142	15,7
1957	1 775	1 358	23,5
Moyenne	1 565	1 250	19,6
<u>BAOULE à DIOILA</u>			
1953	1 455	1 177	19,1
1954	1 530	1 238	19,1
1955	1 280	1 023	20,1
1956	1 240	1 085	12,5
1957	1 535	1 266	17,7
Moyenne	1 408	1 158	17,7
<u>BAGOE à PANKOUROU</u>			
1956	1 240	1 038	16,3
1957	1 565	1 212	22,6
Moyenne	1 403	1 125	19,5

TABLEAU XXII

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT

Année	Pluviométrie mm	Déficit mm	Coefficient d'écoulement %
<u>BANI à DOUNA</u>			
1950	1 450	1 226	15,4
1951	1 465	1 216	17,0
1952	1 290	1 036	19,7
1953	1 400	1 141	18,5
1954	1 455	1 174	19,3
1955	1 390	1 121	19,4
1956	1 155	980	15,2
1957	1 410	1 159	17,8
Moyenne	1 377	1 132	17,8
<u>BANI à BENENY-KEGNY</u>			
1953	1 345	1 090	19,0
1954	1 415	1 166	17,6
1955	1 340	1 092	18,5
1956	1 115	963	13,6
1957	1 340	1 111	17,1
Moyenne	1 311	1 084	17,2
<u>BANI à SOFARA</u>			
1953	1 290	1 142	11,5
1954	1 380	1 227	11,1
1955	1 300	1 142	12,1
1956	1 070	954	10,8
1957	1 300	1 159	10,8
Moyenne	1 268	1 125	11,3

s'expliquer par la faiblesse du relief dans la partie basse du bassin et même depuis FARANAH. Pour DIALAKORO, il faut tenir compte, pour expliquer l'abaissement du déficit, bien que la pluviométrie ne soit guère inférieure, des forts coefficients d'écoulement du NIANDAN et du MILO. Ensuite, le déficit a tendance à croître du fait de l'accroissement de la température moyenne et à décroître du fait de l'abaissement de la pluviométrie : ces deux facteurs semblent à peu près s'équilibrer jusqu'à KOULIKORO.

Sur le NIANDAN, on observe un déficit élevé dû à l'abondance des pluies. Les déficits sont du même ordre sur le MILO et le SANKARANI. Ils sont beaucoup plus élevés sur le TINKISSO : sans doute faut-il y voir l'influence du relief, faible dans ce bassin.

Les déficits du BANI sont du même ordre que ceux du NIGER Supérieur, mais avec des coefficients d'écoulement beaucoup plus faibles, même dans le haut du bassin, par suite du développement des plaines d'inondation.

Quant aux résultats annuels, il y a peu de points aberrants; cependant la dispersion est assez grande, ce qui est normal, puisque d'une part les hauteurs pluviométriques annuelles sont déterminées avec moins de précision et que, d'autre part, les variations des réserves en fin d'année interviennent assez nettement.

L'hétérogénéité des durées d'observations enlève beaucoup de signification aux comparaisons entre bassins. Aussi, bien qu'on ne puisse valablement calculer un déficit que d'après des observations simultanées de pluies et de débits, avons-nous estimé les déficits moyens sur une période de 35 ans en utilisant les lames d'eau calculées. Il est d'ailleurs curieux de constater que les différences avec les moyennes précédentes sont souvent faibles.

Les résultats sont groupés dans les tableaux XXIII à XXV, sur lesquels on a porté également les extrêmes de la période d'observation. Les chiffres se rapportant aux moyennes ont été soulignés. Les différences que l'on peut observer entre les lames d'eau mo-

TABLEAU XXIII

NIGER SUPERIEUR

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ECOULEMENT

Valeurs moyennes et extrêmes

Stations		NIGER à FARANAH	NIGER à KOUROUSSA	NIGER à DIALAKORO	NIGER à KOULIKORO
Surface du bassin (km ²)		3 180	18 000	71 000	120 000
Période d'observations	Nombre d'années	3	13	6	35
	Pluviométrie moyenne (mm)	1 887	1 737	1 753	1 596
	Déficit moyen (mm)	<u>1 125</u>	<u>1 288</u>	<u>1 153</u>	<u>1 164</u>
	Coefficient moyen	<u>40,1</u> %	<u>25,6</u> %	<u>34,2</u> %	<u>26,9</u> %
	Déficit maximal (mm)	1 195	1 622	1 298	1 333
	Déficit minimal (mm)	995	1 069	1 073	1 065
	Coefficient maximal	47,4 %	35,5 %	39,3 %	35,5 %
	Coefficient minimal	30,8 %	20,9 %	30 %	18,7 %
Période de 35 ans	Pluviométrie moyenne (mm)	1 905	1 740	1 696	1 596
	Lame d'eau moyenne (mm)	781	457	558	432
	Déficit moyen (mm)	<u>1 124</u>	<u>1 293</u>	<u>1 138</u>	<u>1 164</u>
	Coefficient moyen	<u>41,0</u> %	<u>26,3</u> %	<u>32,9</u> %	<u>27,0</u> %

TABEAU XXIV

AFFLUENTS DU NIGER SUPERIEUR

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ECOULEMENT

Valeurs moyennes et extrêmes

Stations		: NIANDAN	: MILO	: SANKARANI	: SANKARANI	: TINKISSO
		: à BARO	: à KANKAN	: à MANDIANA	: à GOUALA	: à TINKISSO
Surface du bassin (km ²)		: 12 600	: 9 900	: 21 900	: 35 300	: 6 400
Période d'observations	Nombre d'années	: 11	: 17	: 4	: 4	: 3
	Pluviométrie moyenne (mm)	: 1 972	: 1 865	: 1 666	: 1 596	: 1 668
	Déficit moyen (mm)	: <u>1 291</u>	: <u>1 186</u>	: <u>1 188</u>	: <u>1 197</u>	: <u>1 213</u>
	Coefficient moyen	: <u>34,3</u> %	: <u>36,4</u> %	: <u>28,6</u> %	: <u>25,0</u> %	: <u>27,3</u> %
	Déficit maximal (mm)	: 1 611	: 1 490	: 1 347	: 1 356	: 1 278
	Déficit minimal (mm)	: 1 100	: 963	: 1 016	: 1 061	: 1 104
	Coefficient maximal	: 42,2 %	: 45,7 %	: 31,3 %	: 27,9 %	: 27,8 %
	Coefficient minimal	: 22,2 %	: 29,2 %	: 26,1 %	: 21,7 %	: 26,6 %
Période de 35 ans	Pluviométrie moyenne (mm)	: 1 969	: 1 927	: 1 672	: 1 587	: 1 562
	Lame d'eau moyenne (mm)	: 708	: 717	: 482	: 397	: 422
	Déficit moyen (mm)	: <u>1 261</u>	: <u>1 210</u>	: <u>1 190</u>	: <u>1 190</u>	: <u>1 140</u>
	Coefficient moyen	: <u>36,0</u> %	: <u>37,2</u> %	: <u>28,8</u> %	: <u>25,0</u> %	: <u>27,0</u> %

TABLEAU XXV

BASSIN DU BANI

DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ECOULEMENT

Valeurs moyennes et extrêmes

Stations		BAOULE : à BOUGOUNI :	BAOULE : à DIOILA :	BAGOE : à PANKOUR. :	BANI : à DOUNA :	BANI : à BEN.KEGNY :	BANI : à SOFARA :
Surface du bassin (km ²)		15 700	32 500	31 800	101 600	116 000	129 400
Période d'observations	Nombre d'années	2	5	2	8	5	5
	Pluviométrie moyenne (mm)	1 565	1 408	1 403	1 377	1 311	1 268
	Déficit moyen (mm)	<u>1 250</u>	<u>1 158</u>	<u>1 125</u>	<u>1 132</u>	<u>1 084</u>	<u>1 125</u>
	Coefficient moyen	<u>19,6 %</u>	<u>17,7 %</u>	<u>19,5 %</u>	<u>17,8 %</u>	<u>17,2 %</u>	<u>11,3 %</u>
	Déficit maximal (mm)	1 358	1 266	1 212	1 226	1 166	1 227
	Déficit minimal (mm)	1 142	1 023	1 038	980	963	954
	Coefficient maximal	23,5 %	20,1 %	22,6 %	19,7 %	19,0 %	12,1 %
	Coefficient minimal	15,7 %	12,5 %	16,3 %	15,2 %	13,6 %	10,8 %
Période de 35 ans	Pluviométrie moyenne (mm)	1 499	1 320	1 401	1 264	1 211	1 165
	Lame d'eau moyenne (mm)	280	223	279	214	191	129
	Déficit moyen (mm)	<u>1 219</u>	<u>1 097</u>	<u>1 122</u>	<u>1 050</u>	<u>1 020</u>	<u>1 036</u>
	Coefficient moyen	<u>18,7 %</u>	<u>16,9 %</u>	<u>19,9 %</u>	<u>16,9 %</u>	<u>15,8 %</u>	<u>11,1 %</u>

yennes de ce tableau et celles que l'on trouve au chapitre I de ce volume proviennent du fait qu'elles ont été calculées sur des périodes différentes (respectivement 35 ans et 51 ans).

On obtient ainsi des résultats en général plus satisfaisants, surtout en ce qui concerne le BANI. Par contre, la valeur obtenue pour le TINKISSO semble nettement trop faible.

Sur cette période de 35 ans, le NIANDAN et, pour des raisons différentes, le NIGER à KOUROUSSA, donnent toujours des déficits très élevés. Les valeurs sont voisines pour le MILO et le SANKARANI (de l'ordre de 1200 mm). Quant au BANI, il donne cette fois des résultats nettement plus faibles que pour le NIGER (de 1020 à 1100 mm), sauf sur le cours supérieur du BAOULE.

Les coefficients d'écoulement moyens obtenus pour la période de 35 ans nous semblent plus significatifs, du point de vue régime, que les déficits. Très forts sur le petit bassin du NIGER à FARANAH (environ 40%), sur le NIANDAN, le MILO et le NIGER à DIALAKORO qui a déjà reçu ces derniers affluents (entre 30 et 40%), ils sont moyens sur le SANKARANI et aux autres stations du NIGER, et tombent sur le BANI à des valeurs de plus en plus faibles (moins de 20%) à mesure que l'on approche du confluent ; la chute la plus importante se produit, comme il fallait s'y attendre, entre BENENY-KEGNY et SOFARA (de 16% à 11% environ).

Les valeurs obtenues pour les déficits sont à rapprocher des évaporations obtenues sur bacs Colorado.

Dans les régions très arrosées comme la GUI-NEE forestière, l'évapotranspiration réelle n'est pas très inférieure à l'évapotranspiration potentielle, elle-même probablement plus forte que l'évaporation sur grande surface d'eau libre. On manque de données précises pour l'évapotranspiration de la zone forestière elle-même, mais on peut l'estimer d'après les mesures de pluies et de débits du secteur de BOULA (Haut MILO), de 900 à 1.100 mm. L'évaporation a été mesurée sur bac Colorado et les résultats trouvés correspondent à une

hauteur d'évaporation annuelle de 850 mm environ sur grande retenue. Ces données sont valables pour l'altitude 1.000 m. Au-dessous, l'évapotranspiration croît nettement, elle serait peut être de 1300 à 1400 mm sous la même latitude à l'altitude 400.

A mesure qu'on progresse vers le nord, l'évapotranspiration réelle s'éloigne de l'évapotranspiration potentielle qui tend à se rapprocher, avec la diminution de la forêt, de l'évaporation sur nappe d'eau libre. Sous le parallèle de BAMAKO, l'évaporation sur nappe d'eau libre est de 1800 à 1900 mm (sur grande retenue) alors que le déficit d'écoulement "ponctuel" est très inférieur à 1.000 et même 900 mm.

C H A P I T R E V

IRREGULARITE INTERANNUELLE ET HYDRAULICITE

Nous traitons dans le même chapitre ces deux caractéristiques qui sont liées en plus d'un point. Jusqu'ici nous nous sommes contentés de donner les valeurs centrales d'un certain nombre de caractéristiques du régime tels que modules, écarts-types etc... Ces valeurs ont été déterminées à partir d'un échantillon fini, relatif par exemple à une période de 51 ans pour KOULIKORO. Il faut maintenant s'efforcer de préciser la signification des résultats obtenus par rapport aux véritables valeurs moyennes que l'on pourrait calculer sur une très longue période d'observations (plusieurs centaines d'années par exemple).

En ce qui concerne ce dernier point, l'étude ne porte que sur les débits du NIGER à KOULIKORO, seule station pour laquelle nous possédons une période suffisamment longue de données d'observations directes. Des études analogues pourraient être tentées pour les autres stations du NIGER et du BANI, mais il faudrait tenir compte des écarts aléatoires entraînés par les différentes corrélations adoptées pour l'extension des résultats et cela nous entraînerait beaucoup plus loin.

I - IRREGULARITE INTERANNUELLE

Au cours de l'étude statistique des modules, nous avons signalé que la pente et la position des droites obtenues sur les graphiques à abscisses gaussiennes avaient une signification physique. En fait, ces deux facteurs combinés expriment l'irrégularité interannuelle qui peut être représentée par le coefficient de variation $C_v = \frac{\sigma}{\bar{q}}$, \bar{q} et σ désignant respectivement la moyenne et l'écart-type de l'échantillon de modules considéré.

On peut également caractériser l'irrégularité interannuelle par le coefficient d'irrégularité interannuelle désigné habituellement par K_3 et défini comme le rapport des deux déciles extrêmes : rapport du module de l'année humide de fréquence décennale au module de l'année sèche de fréquence décennale. Ce coefficient est d'une utilisation moins aisée que le coefficient de variation dans les calculs de probabilités, mais il est, par contre, plus "parlant" et d'un emploi immédiat dans les applications pratiques.

Les valeurs trouvées pour les bassins du NIGER et du BANI sont portées sur les tableaux XXVI pour les coefficients de variation et XXVII pour les coefficients d'irrégularité. Sur ce dernier tableau figurent également les modules décennaux d'année sèche et d'année humide.

Parmi les coefficients de variation les plus élevés, on trouve ceux du NIGER à FARANAH, du BAOULE et du BAGOE. Pour FARANAH, cela s'explique par la dimension restreinte du bassin : un petit bassin est alimenté plus irrégulièrement d'une année à l'autre qu'un grand bassin, l'effet compensateur de la distribution spatiale des averses s'y faisant moins sentir. Pour le BAOULE et le BAGOE, il faut invoquer la faiblesse relative des pluies, mal compensée par la diminution de l'écart-type : un régime plus sec est plus irrégulier qu'un régime plus humide.

L'effet compensateur de la distribution spatiale des averses croît avec l'importance du bassin, mais jusqu'à une certaine limite. C'est ainsi que les coefficients des différents bassins du NIGER Supérieur ont des valeurs semblables pour des superficies très différentes. Il faut mettre à part le MILO à KANKAN dont le coefficient de variation ($C_v = 0,149$) est faible et surtout le TINKISSO qui présente un coefficient très faible ($C_v = 0,098$). Ces faits sont dus au développement des plaines d'inondations, en particulier sur ce dernier cours d'eau pour lequel la pente du bief inférieur est très faible. Il se produit dans ce cas une autorégularisation, les fortes crues étant largement écrêtées.

TABLEAU XXVI

BASSINS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Coefficients de variation des modules

NIGER à FARANAN	0,325
NIGER à KOUROUSSA	0,238
NIGER à DIALAKORO	0,204
NIGER à KOULIKORO	0,237
NIANDAN à BARO	0,229
MILO à KANKAN	0,149
SANKARANI à MANDIANA	0,200
SANKARANI à GOUALA	0,204
TINKISSO à TINKISSO	0,098
BAOULE à BOUGOUNI	0,324
BAOULE à DIOILA	0,276
BAGOE à PANKOUROU	0,314
BANI à DOUNA	0,173
BANI à BENENY-KEGNY	0,200
BANI à SOFARA	0,130

TABLEAU XXVII

BASSINS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Coefficient K_3 d'irrégularité interannuelle

Stations	Module ₃ décennal m ³ /s		K_3
	Année humide	Année sèche	
NIGER à FARANAH	98	41	2,38
NIGER à KOUROUSSA	316	165	1,91
NIGER à DIALAKORO	1.485	875	1,69
NIGER à KOULIKORO	2.010	1.060	1,89
NIANDAN à BARO	337	183	1,84
MILO à KANKAN	257	175	1,46
TINKISSO à TINKISSO	95	74	1,29
SANKARANI à MANDIANA	380	225	1,69
SANKARANI à GOUALA	508	302	1,68
BAOULE à BOUGOUNI	179	75	2,40
BAOULE à DIOILA	278	129	2,16
BAGOE à PANKOUROU	352	151	2,23
BANI à DOUNA	820	510	1,61
BANI à BENENY-KEGNY	863	514	1,68
BANI à SOFARA	600	430	1,38

Dans la partie inférieure du BANI (depuis DOUNA) les coefficients de variation sont en moyenne plus faibles que pour le NIGER, malgré un régime plus sec. Ceci est encore dû à l'autorégularisation dans le cours même de la rivière (faible pente, zones d'expansion).

Nous avons dit ci-dessus que les bassins du NIGER Supérieur, hormis le MILO et le TINKISSO, présentent des coefficients de variation semblables. On nous fera remarquer que ces coefficients varient tout de même de 0,200 à 0,238 et qu'il paraît étonnant que le NIGER à KOULIKORO, qui les contrôle tous, ait un des coefficients les plus élevés. En fait, nous verrons dans le paragraphe suivant que ces écarts ne sont pas significatifs au sens statistique du terme. On en conclut que, si l'on peut chercher un sens qualitatif aux écarts entre certaines valeurs, il serait absolument vain de procéder à une recherche systématique des causes physiques de variations.

II - SIGNIFICATION DES VALEURS ESTIMEES D'APRES LA PERIODE 1907-57

Comme nous l'avons fait remarquer au début de ce chapitre, les estimations des moyennes, des écarts-types et des coefficients de variation portent sur un échantillon de 51 valeurs observées ou calculées. Nous nous bornerons ici au cas du NIGER à KOULIKORO pour lequel on dispose de 51 années d'observations.

Le problème posé est le suivant : étant donné que nous avons calculé un paramètre sur un échantillon de 51 valeurs, quel écart dû au seul hasard peut-on attendre avec une probabilité donnée entre cette estimation et celle que l'on effectuerait sur un autre échantillon de 51 valeurs, tiré au hasard dans l'ensemble de la population mère hypothétique supposée infinie ou tout au moins très grande.

- Cas du module

Nous avons vu que le module moyen estimé d'après l'échantillon de 51 ans correspond à une lame d'eau de 406 mm, avec un écart-type de 96,3 mm.

Cette lame d'eau moyenne, considérée par rapport à toutes celles que l'on pourrait calculer en tirant au hasard des échantillons de 51 ans, est elle-même une variable aléatoire caractérisée par :

- une moyenne que l'on peut estimer à 406 mm

- un écart-type que l'on peut estimer à

$$\frac{96,3}{\sqrt{51}} = 13,5 \text{ mm.}$$

Elle suit une loi de GAUSS. Si l'on se fixe un intervalle de variation du module tel que l'on ait 90 chances sur 100 d'avoir la vraie moyenne à l'intérieur de cet intervalle (intervalle de confiance à 90 %), on trouve que la lame d'eau moyenne vraie est comprise entre 384 mm et 428 mm, soit, en passant aux débits :

$$1460 \text{ m}^3/\text{s} < \text{module vrai} \leq 1630 \text{ m}^3/\text{s}$$

Si l'on envisage uniquement l'hypothèse pessimiste, on a 95% de chances pour que le vrai module soit supérieur à 1460 m³/s. Ce seuil de confiance est en général considéré comme acceptable. Autrement dit, si une autre série de 51 ans consécutive à celle que nous venons d'étudier donnait un débit moyen de 1460 m³/s ou de 1630 m³/s, il n'y aurait pas lieu de conclure à une évolution du climat : c'est un écart auquel on peut s'attendre du seul fait du hasard.

En conclusion, si l'on considère une période de durée infinie sans aucune variation climatique, il y aurait 90% de chances pour que le module interannuel soit compris entre 1460 m³/s et 1630 m³/s.

- Ecart-type

L'écart-type calculé sur 51 ans est également une variable aléatoire de moyenne (estimée) 96,3

et d'écart-type $\frac{96,3}{\sqrt{2 \cdot 51}} = \frac{96,3}{\sqrt{102}} = 9,55$

On trouve, pour intervalle de confiance de 90%, que l'écart-type vrai peut être compris entre

80,6 mm et 112,0 mm, soit en débits :

$$306 \text{ m}^3/\text{s} \leq \sigma \leq 425 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Coefficient de variation

On montre que, dans le cas d'une distribution normale, la variance aléatoire du coefficient de variation peut être estimée par :

$$V_{C_V} = \frac{\left(\frac{\sigma}{\bar{q}}\right)^2}{2n} \left(1 + 2 \frac{\sigma^2}{\bar{q}^2}\right)$$

Nous remplacerons les valeurs vraies inconnues de σ et de \bar{q} par leurs valeurs estimées. On peut admettre que l'écart résultant de la substitution est de second ordre. Le coefficient de variation se présente donc à son tour comme une variable aléatoire de moyenne $C_V = 0,237$ et d'écart-type $\sigma'_{C_V} = \sqrt{V_{C_V}} =$

0,0248.

On sait que, sous des hypothèses du reste assez restrictives, la variation aléatoire de C_V suit une loi de GAUSS. Ceci peut être admis pour notre problème particulier. On obtient finalement, pour l'intervalle de confiance à 90 % :

$$0,196 < C_V < 0,278$$

Pour les autres stations du NIGER "raccrochées" par des études corrélatives à une période de 51 ans, la dispersion serait certainement plus importante. La comparaison des coefficients de variation ne peut pas toutefois se faire par simple rapprochement des valeurs obtenues ; il existe en effet une certaine liaison pour les coefficients des bassins du NIGER rapportés à une période donnée, de sorte que leurs variations spatiales ne sont pas entièrement dues au fait du hasard. Malgré cela, et sans pousser plus loin une étude qui risquerait d'être assez longue, on peut estimer que l'éventail des valeurs raisonnablement pos-

sibles de C_v autour de sa valeur centrale est suffisamment étendu pour que les écarts observés d'une station du NIGER à l'autre (hormis les réserves faites pour FARANAH, le MILO et le INTKISSO) ne puissent pas être considérés comme significatifs.

III - VARIATIONS D'HYDRAULICITE AU COURS DE LA PERIODE 1907-1957

On définit l'hydraulicité d'une année donnée comme le rapport du module de cette année au module moyen vrai de la station. Ce module vrai étant inconnu, nous le remplacerons par le module moyen de la période d'observation, soit, pour le NIGER à KOULIKORO, 1545 m³/s

Les résultats figurent sur le tableau XXVIII et sont représentés par le périodogramme d'hydraulicité tracé sur le graphique 22.

Ce graphique semble indiquer une variation cyclique plutôt que périodique. On n'y décèle aucune tendance générale à la hausse ou à la baisse, tout au moins de façon significative. Il nous paraît prématuré, étant donné le nombre très faible de cycles observés, de se livrer à une analyse du périodogramme.

Ce dernier est cependant précieux, car il contient seul, associé à la moyenne, la totalité de l'information que nous possédons sur les débits moyens annuels du NIGER. Dans l'étude statistique des modules, utile à bien d'autres points de vue, on perd en effet, du seul fait que l'on classe ces modules, une partie importante de l'information : celle qui concerne la succession des années sèches et humides. Or, ce dernier élément devrait être pris en compte pour tout projet d'aménagement.

IV - COMPARAISON DES HYDRAULICITES DU NIL ET DU NIGER

Nous avons estimé plus haut le degré de confiance que l'on pouvait accorder à la moyenne et au coefficient de variation calculés d'après la série d'observations de 51 ans. Les résultats auxquels nous avons abouti nous renseignent sur les variations que

TABLEAU XXVIII

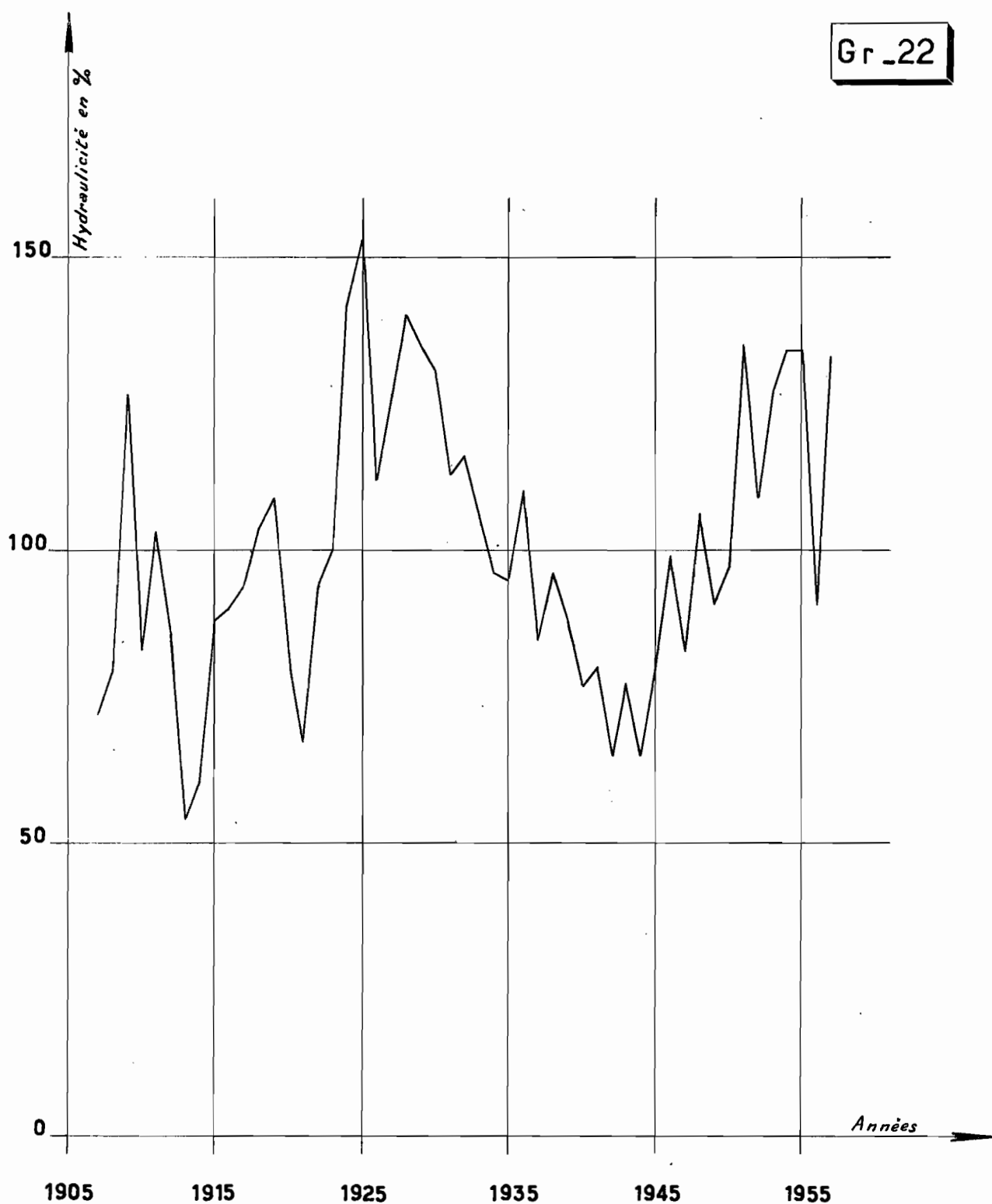
HYDRAULICITE DU NIGER A KOULIKORO

par rapport à la moyenne de la période 1907-1957 : 1.545 m³/s

Année	Hydraulicité (en %)	Année	Hydraulicité (en %)
1907	74	1931	113
1908	79	1932	116
1909	126	1933	106
1910	83	1934	96
1911	103	1935	95
1912	85	1936	110
1913	54	1937	85
1914	60	1938	96
1915	88	1939	88
1916	90	1940	77
1917	94	1941	80
1918	104	1942	65
1919	109	1943	77
1920	80	1944	65
1921	68	1945	80
1922	94	1946	99
1923	100	1947	83
1924	142	1948	106
1925	153	1949	91
1926	112	1950	97
1927	126	1951	135
1928	140	1952	109
1929	135	1953	127
1930	131	1954	134
		1955	134
		1956	91
		1957	133

Hydraulicité du NIGER à KOULIKORO par Rapport à la Moyenne de la Période 1907 - 1957 ($1545\text{m}^3/\text{s}$)

Gr 22



NIG 8294

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

ED:

LE: 28-4-59

DES: J. Méryer

VISA:

TUBE N°:

AO

l'on peut normalement attendre du seul fait du hasard (fluctuations d'échantillonnage).

On peut maintenant se demander s'il n'existe pas d'autres possibilités de variation dépassant les marges accordées par le hasard et dues, par exemple, à une modification progressive du climat. Nous avons noté que l'examen du périodogramme des 51 années d'observations ne nous permet pas de conclure à de telles modifications. Mais cette période de 51 ans est somme toutes assez courte et on peut se demander s'il en serait de même pendant une période de plus longue durée.

On est ainsi amené à chercher, parmi des fleuves relevant d'un régime analogue, s'il existe des observations sur une plus longue durée et à comparer leurs périodogrammes à celui du NIGER. Depuis longtemps déjà, on s'est aperçu qu'il existe un certain parallèle entre les hydraulicités du NIL à ASSOUAN et celles du NIGER à KOULIKORO. Cette corrélation a des raisons physiques précises : les débits des deux fleuves sont déterminés par le même phénomène, la "mousson d'Afrique", et nous ajoutons que pour les variations d'hydraulicité du NIL les apports d'origine équatoriale sont pratiquement sans effet : ils proviennent du NIL Blanc qui, par suite de l'autorégularisation dans les immenses marais du BAHR el GHAZAL, présente une abondance annuelle presque constante. La comparaison est intéressante car on possède des relevés du NIL à ASSOUAN depuis 1871. Nous allons essayer, dans ce qui suit, de préciser la nature et l'intensité de la liaison entre les hydraulicités de ces deux cours d'eau.

1°) Etude de la corrélation de l'hydraulicité du NIGER et du NIL

Pour que les hydraulicités soient comparatives, il convient de les calculer à partir du débit moyen d'une même période. On pourrait prendre évidemment la période d'observations simultanées 1907-1945, mais le calcul ayant déjà été fait, à d'autres fins, en prenant pour base le débit moyen de la période 1933-1945, nous conserverons les chiffres obtenus. Le choix de la période de référence n'a du reste aucune importance pour le but que nous nous proposons.

Les résultats sont groupés dans le tableau XXIX pour le NIGER et le tableau XXX pour le NIL. Le graphique 23 représente la covariation de ces hydraulicités.

L'examen du graphique montre que les hydraulicités se correspondent assez bien, sauf pour la période 1924-1934 encore que, même pour cette période, on relève parfois des tendances analogues. On observe certains décalages entre les deux séries chronologiques, mais ces décalages se font tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. On pourrait évidemment améliorer la correspondance en faisant coïncider les pointes des minima et des maxima ou considérer des moyennes sur plusieurs années. Ces procédés nous paraissent en l'occurrence bien arbitraires ; de plus, le fait de grouper des années ferait perdre en dispersion ce que l'on gagnerait en corrélation.

L'étude de la corrélation portera donc, sans modification, sur les couples de points (X_i, Y_i) , X_i désignant l'hydraulicité du NIL pour une année donnée et Y_i celle du NIGER la même année ; ces hydraulicités, nous le rappelons, sont calculées par rapport à la période 1933-45.

La période de recouvrement des observations en notre possession sur le NIL et sur le NIGER s'étend de 1907 à 1945, soit 39 ans. Nous éliminerons les observations des années 1924 et 1925 que nous avons des raisons de suspecter, indépendamment du fait que les hydraulicités du NIGER pour ces années n'ont aucun rapport avec celles du NIL. Il nous reste donc 37 observations simultanées pour X et pour Y.

Ces deux variables suivent, chacune pour son propre compte, des lois de distribution normale ou du moins très voisines de la normale. On sait que, dans ces conditions le couple (X, Y) suit une loi normale à deux variables.

Si nous considérons X seul, on trouve comme estimations de la moyenne et de l'écart-type sur l'échantillon de 37 années :

TABLEAU XXIX

HYDRAULICITE du NIGER à KOULIKORO

(par rapport à la moyenne 1933-1945 : 1.330 m³/s)

Année	Hydraulicité (en %)	Année	Hydraulicité (en %)
1907	86	1936	128
1908	92	1937	98
1909	146	1938	111
1910	96	1939	102
		1940	89
1911	120		
1912	98	1941	93
1913	63	1942	76
1914	70	1943	90
1915	103	1944	75
		1945	93
1916	105		
1917	109	1946	114
1918	137	1947	97
1919	106	1948	123
1920	93	1949	105
		1950	112
1921	79		
1922	109	1951	157
1923	117	1952	126
1924	165	1953	147
1925	177	1954	155
		1955	155
1926	130		
1927	146	1956	106
1928	163	1957	154
1929	156		
1930	152		
1931	132	Moyenne	116
1932	134		
1933	124		
1934	111		
1935	110		

TABLEAU XXX

HYDRAULICITE DU NIL A ASSOUAN
(par rapport à la moyenne 1933-1945)

Année:	Hydraulicité	Année:	Hydraulicité	Année:	Hydraulicité
:	(en %)	:	(en %)	:	(en %)
1871:	137	1901:	107	1931:	95
1872:	142	1902:	85	1932:	104
1873:	118	1903:	115	1933:	101
1874:	148	1904:	101	1934:	111
1875:	142	1905:	86	1935:	119
1876:	142	1906:	113	1936:	108
1877:	100	1907:	85	1937:	99
1878:	151	1908:	125	1938:	124
1879:	168	1909:	129	1939:	92
1880:	140	1910:	119	1940:	81
1881:	122	1911:	101	1941:	78
1882:	115	1912:	87	1942:	102
1883:	136	1913:	56	1943:	97
1884:	122	1914:	103	1944:	89
1885:	125	1915:	85	1945:	96
1886:	118	1916:	139		
1887:	145	1917:	135		
1888:	98	1918:	99		
1889:	118	1919:	95		
1890:	140	1920:	102		
1891:	135	1921:	94		
1892:	148	1922:	104		
1893:	141	1923:	106		
1894:	153	1924:	106		
1895:	155	1925:	83		
1896:	150	1926:	104		
1897:	126	1927:	89		
1898:	135	1928:	97		
1899:	95	1929:	126		
1900:	103	1930:	91		

NIG 8295

ED:

LE: 28-4-59

DES: J. Méryer

VISA:

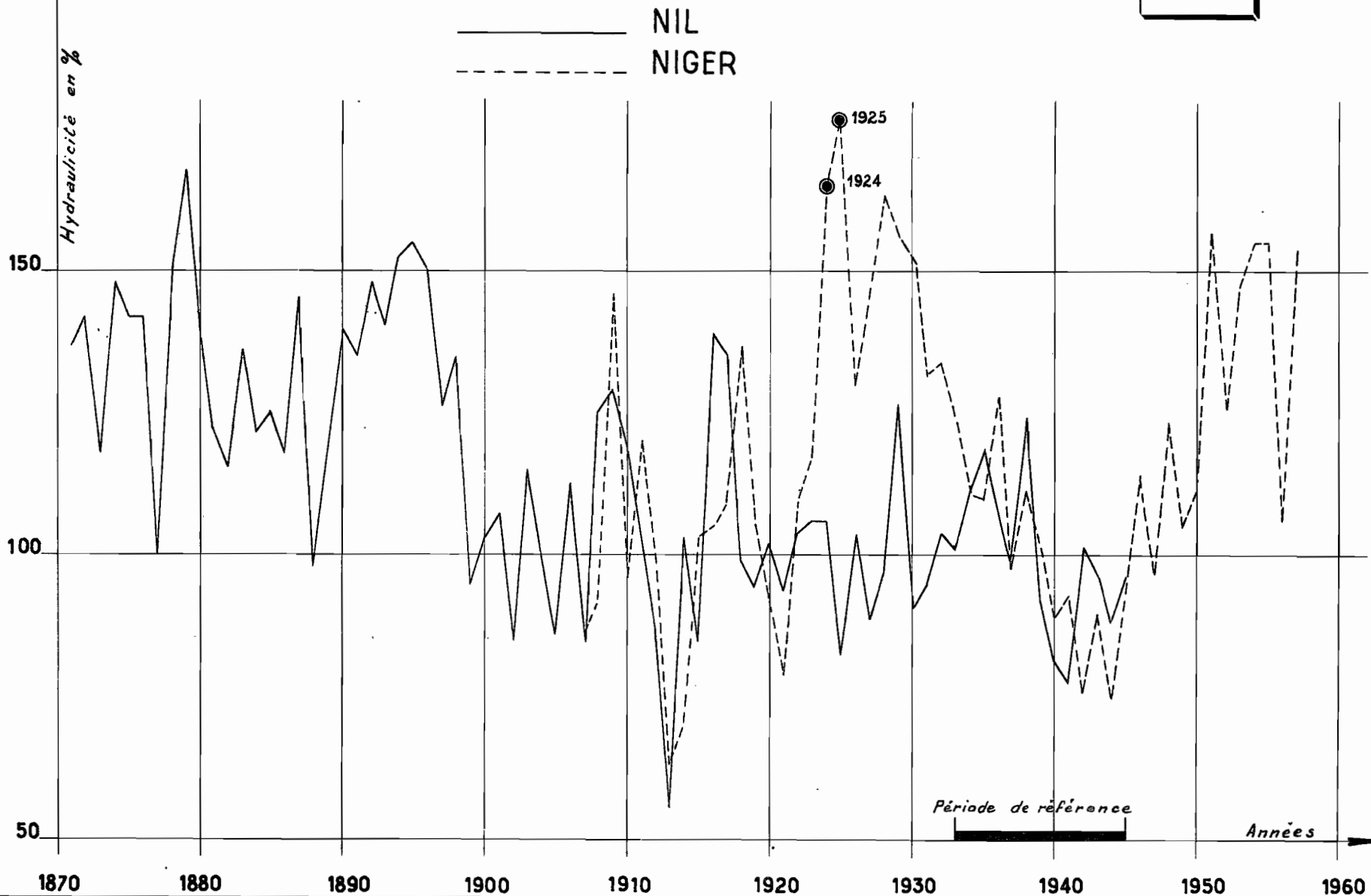
TUBE N°:

AO

ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER

Covariation des hydraulicités du NIL et du NIGER rapportées à la moyenne de la période 1933 - 1945

Gr_23



$$\bar{X} = 101,81$$

$$\sigma_x = 16,65$$

Pour Y seul :

$$\bar{Y} = 109,24$$

$$\sigma_y = 24,83$$

La covariance de X et de Y estimée d'après l'échantillon est égale à :

$$\frac{\sum (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{N} = 127,74$$

d'où un coefficient de corrélation :

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{N \sigma_x \sigma_y}$$

estimé à 0,31.

Ce coefficient est faible. Il faut avant de poursuivre les calculs savoir s'il diffère significativement de zéro, c'est-à-dire si l'on peut admettre qu'il existe une corrélation. La table de répartition de r montre que pour $N - 2 = 35$ degrés de liberté, la valeur de 0,31 a environ 5% de chances d'être dépassée pour un échantillon de 37 couples tiré au hasard. C'est le seuil de confiance généralement admis. On peut donc dire qu'il y a vraiment corrélation et admettre comme valeur moyenne $r = 0,31$.

La probabilité élémentaire d'un couple (X,Y) peut s'écrire :

$$f(X,Y) dX dY = \frac{1}{2\pi \sigma_X \sigma_Y \sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)} \phi(X,Y)} dx dy$$

$$\text{avec } \phi(X,Y) = \frac{(X - \bar{X})^2}{\sigma_X^2} - 2r \frac{(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sigma_X \sigma_Y} + \frac{(Y - \bar{Y})^2}{\sigma_Y^2}$$

Ce qui nous intéresse ici tout particulièrement c'est la distribution de Y (NIGER) liée par X (NIL) qui nous permettra de passer des hydraulicités du NIL à celles du NIGER. Elle s'exprime par la probabilité conditionnelle élémentaire :

$$f_X(Y) dY = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Y \sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{Y - \bar{Y}}{\sigma_Y} - r \frac{X - \bar{X}}{\sigma_X} \right]^2} dY$$

de moyenne conditionnelle.

$$Y = \bar{Y} + r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (X - \bar{X})$$

L'équation ci-dessus permet d'estimer "au mieux" l'hydraulicité Y du NIGER à partir de l'hydraulicité X du NIL. On trouve, en passant aux valeurs numériques :

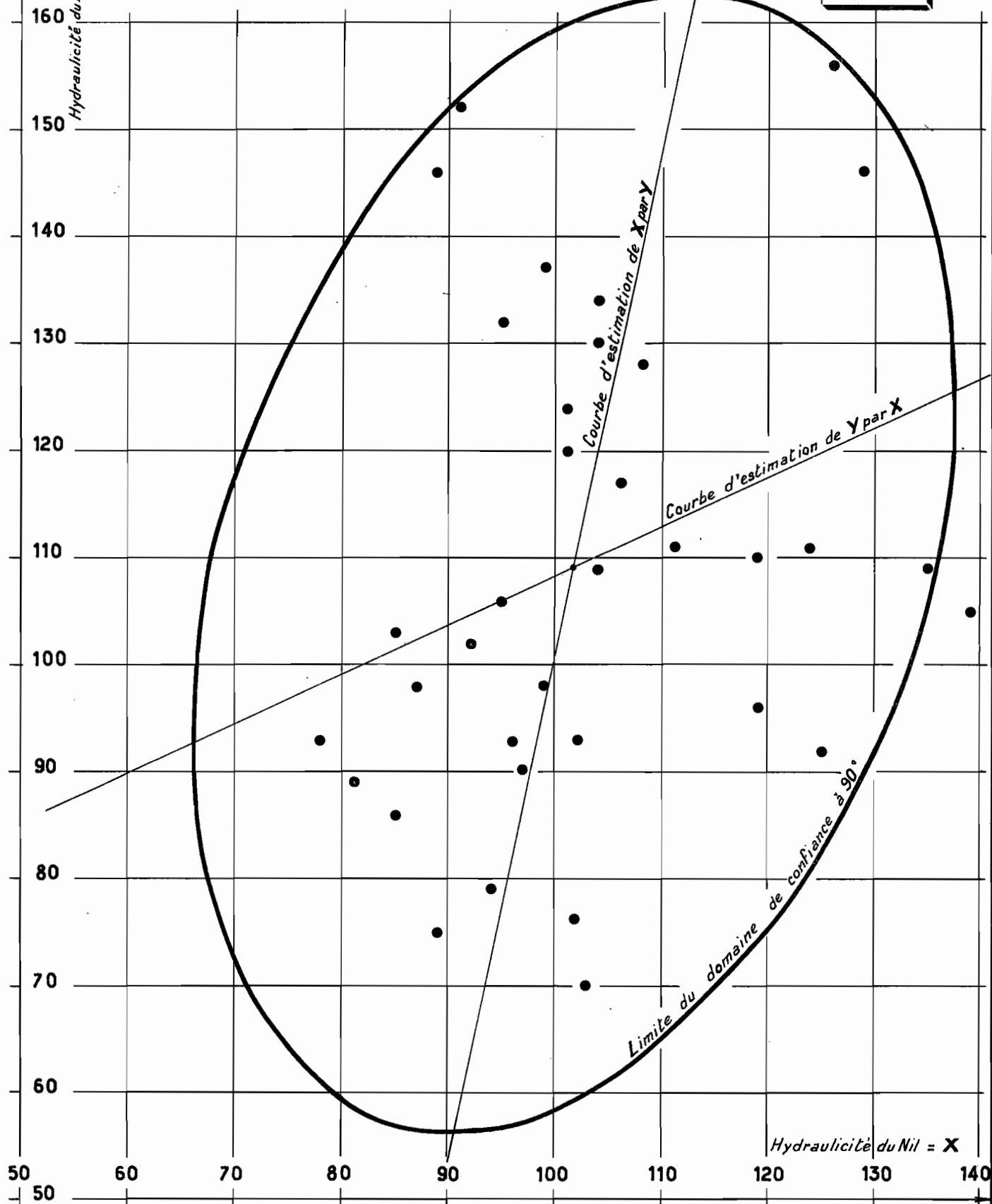
$$Y = 0,462 X + 62,2$$

Nous avons porté sur le graphique 24 les couples de points (X_i, Y_i) , ainsi que les droites d'estimation de Y par X et de X par Y. Les points correspondant aux années 1924 et 1925 non utilisés pour l'estimation ont été cerclés.

Corrélation entre les hydraulicités du NIL et du NIGER (en %)

Gr_24

● 1924



2°) Signification des points aberrants

Avant d'effectuer les estimations des hydraulicités du NIGER par celles du NIL, nous chercherons à tirer quelques enseignements supplémentaires de cette étude de corrélation. En reprenant l'expression de la probabilité élémentaire d'un couple (X, Y) on remarque que les ellipses d'équation

$$\frac{1}{1 - r^2} \left[\frac{(X - \bar{X})^2}{\sigma_X^2} - 2r \frac{(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sigma_X \sigma_Y} + \frac{(Y - \bar{Y})^2}{\sigma_Y^2} \right] = a^2$$

sont des courbes d'égale densité de probabilité. Or a^2 est une variable aléatoire qui suit une loi de χ^2 à deux degrés de liberté. On peut donc, à l'aide des tables de χ^2 déterminer a^2 de façon que ce dernier ait une probabilité de 90% de ne pas être dépassé (seuil de confiance déjà adopté plus haut). On trouve $a^2 = 4,60$

$$\text{Posons } x = \frac{X - \bar{X}}{\sigma_X} \quad y = \frac{Y - \bar{Y}}{\sigma_Y}$$

On prend ainsi le point de coordonnées \bar{X} et \bar{Y} (moyennes) comme nouvelle origine et on ramène l'équation de l'ellipse à

$$x^2 - 0,62 xy + y^2 = 4,158$$

ce qui va nous permettre de la tracer facilement, point par point (graphique 24).

On a ainsi déterminé le domaine dans lequel le point représentatif d'un couple (X,Y) a 90 chances sur 100 de se trouver. Autrement dit, ce point n'aura que 10% de chances de se trouver à l'extérieur et 5% seulement si l'on précise dans quelle partie du plan divisé en deux par le grand axe de l'ellipse.

La section, par un plan vertical au graphique et parallèle à l'un des axes principaux, de la colline constituée par les ellipses homothétiques correspon-

dant à différentes probabilités de dépassement de a^2 , est une courbe de GAUSS et les probabilités décroissent très vite quand on s'éloigne de l'autre axe principal. Sans faire un calcul qui ne présenterait aucune difficulté mais n'aurait pas grand intérêt, on peut dire que la position du point représentatif de l'année 1925, très en dehors du domaine de confiance, correspond à une probabilité extrêmement petite. Ce n'est pas une raison suffisante pour rejeter le débit moyen trouvé cette année-ci sur le NIGER, mais cette constatation s'ajoute au faisceau d'arguments déjà réunis précédemment en faveur de ce rejet.

V - RECHERCHE D'UNE EVOLUTION POSSIBLE DU CLIMAT

La relation de régression $Y = 0,462 X + 62,2$ permet d'estimer les hydraulicités annuelles du NIGER pour la période 1871-1906. Les résultats sont portés sur le tableau XXXI. On trouve pour cette période une hydraulicité moyenne de 121% contre 116 % pour la période 1907-1957, les hydraulicités étant toujours rapportées au module moyen de la période 1933-1945. Ceci permet d'évaluer le module moyen de 1871 à 1906 sur le NIGER à :

$$\frac{1545 \times 121}{116} = 1.610 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ce chiffre prouve t-il que le climat s'est modifié d'une période à l'autre ?

En admettant que l'échantillon de 36 années représentant la période 1871-1906 est tiré de la même population que celui de 51 années pour lequel on possède des observations directes, son écart type aléatoire est de $62 \text{ m}^3/\text{s}$. Si l'on admet comme précédemment un intervalle correspondant à une confiance de 90%, le débit moyen de la période 1871-1906 peut varier de 1.443 à $1.657 \text{ m}^3/\text{s}$ sous le seul effet du hasard. Encore ce résultat suppose-t-il un coefficient de corrélation entre X et Y, égal ou très voisin de l'unité. Or, nous savons qu'il est très loin d'en être ainsi. La prise en compte de la variation aléatoire de ce coefficient de corrélation conduirait à un intervalle de confiance beaucoup plus large pour

TABLEAU XXXI

ESTIMATION DE L'HYDRAULICITE DU NIGER
A PARTIR DE CELLE DU NIL POUR LA PERIODE 1871-1906

Y = 0,462 X + 62,2
Y - Hydraulicité estimée du NIGER } par rapport à la
X - Hydraulicité du NIL } période 1933-1945

Année	X %	Y %	Année	X %	Y %
1871	137	126	1891	135	125
1872	142	128	1892	148	131
1873	118	117	1893	141	127
1874	148	131	1894	153	133
1875	142	128	1895	155	134
1876	142	128	1896	150	132
1877	100	108	1897	126	120
1878	151	132	1898	135	125
1879	168	140	1899	95	106
1880	140	127	1900	103	110
1881	122	119	1901	107	112
1882	115	115	1902	85	102
1883	136	125	1903	115	115
1884	122	119	1904	101	109
1885	125	120	1905	86	102
1886	118	117	1906	113	114
1887	145	129			
1888	98	108			
1889	118	117	Moyennes	127	121
1890	140	127			

le module moyen.

L'écart observé n'est donc pas significatif et on ne peut pas conclure qu'il y ait eu modification du climat.

On pourrait, à la rigueur, utiliser l'étude des corrélations pour préciser la valeur centrale à adopter pour la moyenne. D'après les relations établies ci-dessus, on obtiendrait pour la période 1871-1957 un module moyen de :

$$\frac{1.610 \times 36 + 1.545 \times 51}{87} \approx 1.570 \text{ m}^3/\text{s}$$

Mais il faudrait alors augmenter la dispersion aléatoire de cette moyenne pour tenir compte de la faible corrélation et finalement le gain d'information serait minime.

Il existe en Afrique Tropicale d'autres exemples de corrélation entre hydraulité de bassins hydrologiques assez éloignés l'un de l'autre. On a déjà mis en évidence, par exemple, la corrélation entre les débits du NIL et ceux du CHARI (ou les variations de niveau du Lac TCHAD). Il y a également corrélation entre hydraulité du SENEGAL et celle du NIGER. Il semble, d'ailleurs, que ces corrélations soient beaucoup plus serrées que celle qui a été observée entre NIL et NIGER. Cela provient simplement du fait que la période de recouvrement 1907-1945 comporte, en son milieu, un certain nombre d'années pour lesquelles il y a eu d'importantes discordances, alors qu'au contraire, de nombreux indices existent d'une assez bonne concordance pour la période antérieure à 1907 et postérieure à 1945.

Des études de détail faites tous les ans dans l'annuaire hydrologique montrent bien un parallélisme de variation des débits dans toute la zone tropicale entre le 9ème et le 13ème parallèle en A.O.F. et le 7ème et le 11ème parallèle en A.E.F.

L'hydraulité du SENEGAL, du NIGER, du CHARI et du NIL devrait présenter des diagrammes de variation très voisins. Or, pour le Lac TCHAD, le

Général TILHO avait essayé dans son ouvrage "Le TCHAD et la capture du LOGONE par le NIGER", de reconstituer de façon qualitative les variations d'hydraulicité sur une très longue période. Nous reproduisons ci-après le graphique auquel il avait abouti.

Depuis la date de cette publication l'allure générale de ce graphique a bien été confirmée. On assiste donc à une succession de périodes humides et de périodes sèches, dont la durée varie de 15 à 40 ans. Elles sont indépendantes des grandes variations de climat qui, elles, ont certainement existé et ont joué probablement sur plusieurs milliers d'années. La période sèche de 1904 à 1920, marquée par l'année catastrophique 1913, succédant à la période humide 1860-1898 avait fortement impressionné les géographes et avait conduit à l'hypothèse d'un dessèchement de l'Afrique beaucoup plus rapide qu'il ne l'est en réalité. La période humide actuelle qui a commencé en 1948 montre bien qu'il s'agissait d'un point bas d'une série de fluctuations.

Ceci n'exclut pas la possibilité d'un très lent dessèchement correspondant à une variation climatique de grande amplitude. De nombreux indices sur toute la bordure sud du SAHARA montrent que le climat il y a 4.000-6.000 ans avant Jésus-Christ était beaucoup plus humide que le climat actuel; par exemple, sous le 17ème parallèle, les précipitations devaient dépasser à l'époque 500 mm, alors qu'elles varient maintenant de 30 à 100 mm suivant l'exposition. C'est là le changement de climat le plus proche de nous. Il y a eu également des périodes à climat sec, puisque le fond du Lac TCHAD est constitué par des dunes de sable, ce qui prouve qu'il a été asséché, donc, qu'il a subi un climat beaucoup plus aride que le climat actuel.

Le passage de la période humide de 4.000-6.000 ans avant Jésus-Christ, à la période actuelle, s'est bien entendu fait très progressivement et il est possible qu'il y a 3 ou 4 siècles les conditions d'hydraulicité générale aient été légèrement différentes des conditions actuelles. Il suffit de modifications extrêmement faibles pour expliquer la facilité relative avec laquelle les marocains ont traversé le Sahara.

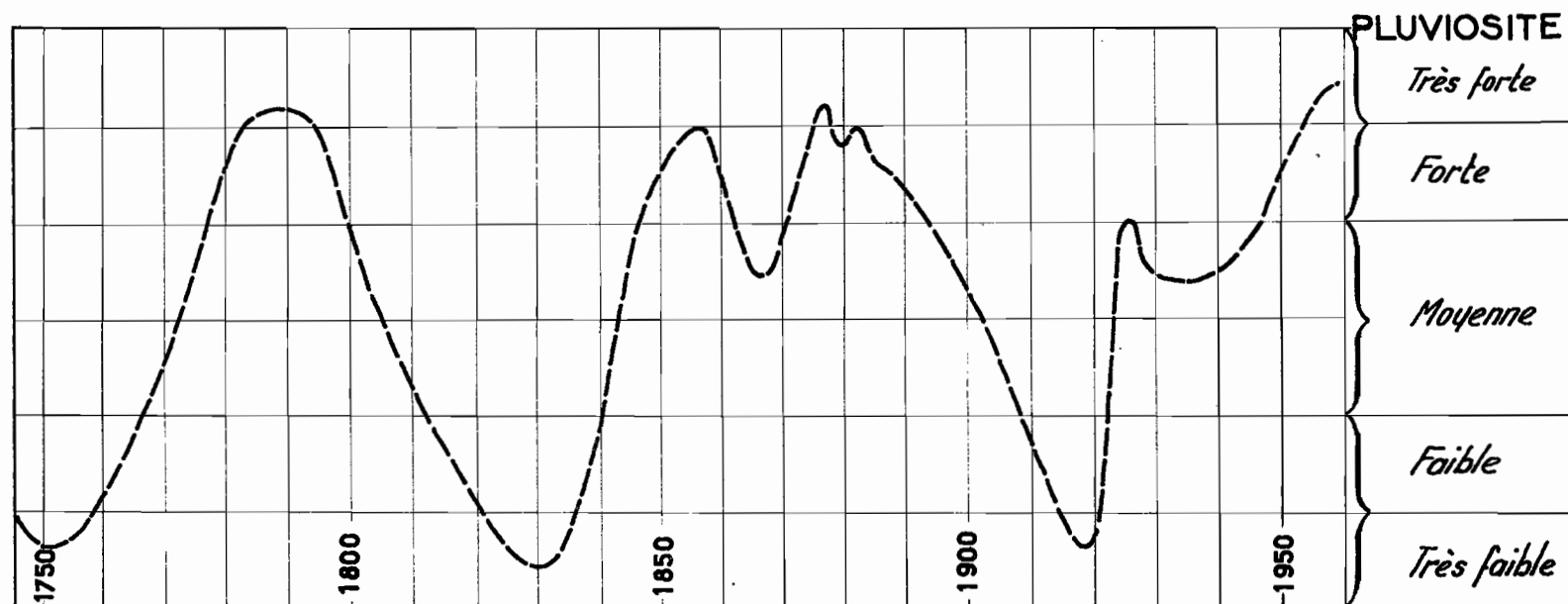
NIG 8297

ED: ELECTRICITÉ DE FRANCE - SERVICE DES ETUDES D'OUTRE-MER
LE: DES: VISA: TUBE N°: AO

Gr_25

COURBE SCHEMATIQUE

DES GRANDES VARIATIONS PROBABLES DE LA PLUVIOSITE TCHADIENNE
DEPUIS LE MILIEU DU XVIII^e SIECLE



Extrait de : "Le TCHAD et la capture du LOGONE par le NIGER" par le Général TILHO.

Concluons qu'à l'échelle de nos études on peut considérer le climat du bassin du NIGER comme stable et nous en tenir aux fluctuations d'hydraulicité dont nous avons donné le graphique. Des études sont d'ailleurs en cours à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, à ce sujet.

C H A P I T R E V I

RESUME DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU REGIME

Nous concluerons la monographie du NIGER Supérieur par un résumé des principales caractéristiques dégagées au cours du présent volume. Il nous a paru commode pour le lecteur de présenter ces résultats sous forme de fiches dont chacune correspond à une station. Il ne fait cependant pas perdre de vue que les indications portées sur ces fiches n'ont pas toutes la même valeur et que leur utilisation rationnelle exige la connaissance du processus de leur établissement, c'est-à-dire la lecture des différents chapitres de ce volume.

Les résultats obtenus permettent de préciser le régime des deux bassins étudiés. Le NIGER Supérieur, entièrement tropical de transition, sauf peut-être dans sa partie la plus septentrionale, est assez bien arrosé (1.600 mm en moyenne sur la totalité de son bassin). Certains de ses affluents, MILO, NIANDAN et SANKARANI, bénéficient, à des degrés du reste très différents, des précipitations abondantes de la GUINEE forestière.

Les étiages spécifiques varient en moyenne de 0,4 à 1 l/s.km².

Les crues sont peu violentes, les valeurs spécifiques décennales dépassant rarement 100 l/s.km² pour des bassins de plus de 10.000 km² (contre plus de 400 pour le KONKOURE). Les maxima annuels se produisent le plus fréquemment au cours de la troisième décade de Septembre et ont rarement lieu en dehors de la période de deux mois : 20 Août - 20 Octobre. L'abondance annuelle est moyenne avec des valeurs spécifiques tournant autour de 15 l/s.km² (sauf pour la GUINEE forestière). L'irrégularité interannuelle présente une valeur moyenne (K_3 varie de 1,4 à 2,4).

Le BANI présente un régime analogue mais plus sec (1.165 mm de précipitation moyenne sur l'ensemble du bassin). Une partie importante du bassin peut être considérée comme relevant du régime tropical pur.

Les étiages sont plus longs et plus sévères que sur le NIGER Supérieur et ses affluents : débits spécifiques moyens variant de 0,2 à 0,5 l/s.km².

Les crues sont très faibles, surtout sur la partie inférieure du cours où elles subissent un laminage efficace. Les valeurs spécifiques décennales sont inférieures en général à 50 l/s.km². Elles tombent à 30 et même 12 l/s.km² à partir de DOUNA. Les maxima annuels se produisent le plus fréquemment pendant la troisième décade de Septembre dans le bassin supérieur (sensiblement à la même époque que sur le NIGER Supérieur) puis à des dates de plus en plus tardives à mesure que l'on se rapproche du confluent.

L'abondance annuelle est plus faible que pour le NIGER par suite du climat plus sec et aussi du relief moins accentué, plus favorable à l'évaporation. Les modules spécifiques oscillent entre 6,6 l/s.km² pour le bassin limité à DOUNA et 4,0 l/s.km² environ au confluent du NIGER. L'irrégularité inter-annuelle est du même ordre que celle du NIGER Supérieur, peut-être un peu plus faible.

Dans cette monographie, il n'a pas été question des transports solides, étant donné que très peu de mesures ont été effectuées dans ce domaine. L. REFFAY cite, dans son ouvrage "Régime du NIGER", des mesures sporadiques de turbidité effectuées en 1923 à KOULIKORO par la Compagnie Générale des Colonies. Les teneurs de matières en suspension variaient de 17 g/m³ en étiage (avril) à 107 g/m³ en crue (Juillet). Ces chiffres correspondent à une faible turbidité. Des mesures plus complètes de matières en suspension sur d'autres fleuves tropicaux de transition : BENOUE, CHARI, LOGONE, ont montré que dès que le bassin versant dépasse 30.000 km² la turbidité descend au-dessous de 300 g/m³.

PARIS 1959

J. AUVRAY - M. ROCHE - J. RODIER

COURS D'EAU : NIGER
 STATION : FARANAH
 SUPERFICIE DU BASSIN : 3.180 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.905 mm
 sur 35 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
<u>MODULE MOYEN</u> estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	69	21,7
<u>COEFFICIENT de VARIATION</u> estimé dans les mêmes conditions	0,325	

CRUES :

Maximum observé sur 3 ans	297	93,5
Crue décennale estimée à	((300))	((95))
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre
 Etalement de la courbe de fréquence vers la période postérieure

ETIAGES :

	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	
Valeur décennale :	Difficiles à estimer
Valeur la plus fréquente :	
Valeur moyenne :	

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

Per.:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
3 ans:	26,2	16,5	15,7	9,8	8,9	57	104	121	183	198	130	57

COURS D'EAU : NIGER
 STATION : KOUROUSSA
 SUPERFICIE DU BASSIN : 18.000 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.740 mm
 sur 35 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
<u>MODULE MOYEN</u> estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	241	13,4
<u>COEFFICIENT de VARIATION</u> estimé dans les mêmes conditions		0,238

CRUES :

Maximum observé sur 15 ans	1.710	95
Crue décennale estimée à	1.440	80
Crue centenaire estimée à	(1.850)	(103)
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre
 Etalement de la courbe de fréquence à peu près équivalent de
 part et d'autre du maximum.

ETIAGES :

	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	0,12
Valeur décennale :	0,17
Valeur la plus fréquente :	0,25
Valeur moyenne :	0,37

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

Per.:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
15 ans:	104	60	31	20	25	104	244	424	840	710	379	181

COURS D'EAU : NIGER
 STATION : DIALAKORO
 SUPERFICIE DU BASSIN : 71.000 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.696 mm
 sur 35 ans

Valeurs absolues Valeurs spécifiques
 m³/s l/s.km²

MODULE MOYEN estimé à partir
 d'une période de 51 ans de 1.160 16,3
 débits observés ou calculés

COEFFICIENT de VARIATION
 estimé dans les mêmes 0,204
 conditions

CRUES :

Maximum observé sur 6 ans 5.370 75,5
 Crue décennale estimée à 5.070 71,5
 Crue centenaire estimée à (6.000) (85)
 Eventualité :

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre
 Etalement de la courbe de fréquence vers la période antérieure,
 peu significatif.

Valeurs spécifiques
 l/s.km²

ETIAGES :

Limite inférieure : 0,15
 Valeur décennale : 0,23
 Valeur la plus fréquente : 0,34
 Valeur moyenne : 0,51

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

```

=====
: Per.: J : F : M : A : M : J : J : A : S : O : N : D :
:-----:
:      :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :
:6 ans: 430: 236: 156: 118: 131: 438:1318:2730:4144:3839:1830: 801:
:      :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :
=====

```


COURS D'EAU : NIGER
 STATION : KOULIKORO
 SUPERFICIE DU BASSIN : 120.000 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.596 mm
 sur 35 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
<u>MODULE MOYEN</u> estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	1.545	12,9
<u>COEFFICIENT de VARIATION</u> estimé dans les mêmes conditions		0,237

CRUES :

Maximum observé sur 51 ans	9.700 ?	81 ?
Crue décennale estimée à	7.900	66
Crue centenaire estimée à	9.600	80
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre
 Etalement de la courbe de fréquence : légère dissymétrie en
 faveur de la période postérieure.

<u>ETIAGES :</u>	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	0,12
Valeur décennale :	0,18
Valeur la plus fréquente :	0,27
Valeur moyenne :	0,40

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

```

=====
: Pér.: J : F : M : A : M : J : J : A : S : O : N : D :
:-----:
:      :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :
:51 ans: 399: 192: 100: 67: 95: 361:1239:3214:5284:4560:2088: 864:
:      :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :
=====

```

COURS D'EAU : NIANDAN
 STATION : BARO
 SUPERFICIE DU BASSIN : 12.600 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.969 mm
 sur 35 ans

Valeurs absolues Valeurs spécifiques
 m³/s l/s.km²

MODULE MOYEN estimé à partir
 d'une période de 51 ans de
 débits observés ou calculés

261

20,7

COEFFICIENT de VARIATION
 estimé dans les mêmes
 conditions

0,229

CRUES :

Maximum observé sur 12 ans	1.490	118
Crue décennale estimée à	1.370	109
Crue centenaire estimée à	(1.720)	(136)
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 1er au 20 Septembre
 Etalement de la courbe de fréquence à peu près symétrique.

Valeurs spécifiques
 l/s.km²

ETIAGES :

Limite inférieure	:	0,29
Valeur décennale	:	0,40
Valeur la plus fréquente	:	0,61
Valeur moyenne	:	0,91

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
12 ans	79	44	38	31	48	145	353	524	816	621	353	145

COURS D'EAU : MILO
 STATION : KONSANKORO
 SUPERFICIE DU BASSIN : 1.000 km²

Valeurs absolues Valeurs spécifiques
 m³/s l/s.km²

MODULE MOYEN estimé à partir
 d'une période de 51 ans de
 débits observés ou calculés

COEFFICIENT de VARIATION
 estimé dans les mêmes
 conditions

CRUES :

Maximum observé sur 3 ans	276	276
Crue décennale estimée à	((300))	((300))
Crue centenaire estimée à		
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 11 au 20 Septembre.

<u>ETIAGES</u> :		Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :		0,9
Valeur décennale :		1,2
Valeur la plus fréquente :		2
Valeur moyenne :		3

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
3 ans :	9,8	8,4	10,8	10,6	15,5	38	39	70	95	65	24	16

COURS D'EAU : MILO
 STATION : KANKAN
 SUPERFICIE DU BASSIN : 9.900 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.927 mm
 sur 35 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
MODULE MOYEN estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	216	21,8
COEFFICIENT de VARIATION estimé dans les mêmes conditions	0,149	

CRUES :

Maximum observé sur 17 ans	1.106	112
Crue décennale estimée à	1.090	110
Crue centenaire estimée à	(1.300)	(131)
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre
 Etalement de la courbe de fréquence vers la période antérieure

ETIAGES :

	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	0,35
Valeur décennale :	0,49
Valeur la plus fréquente :	0,75
Valeur moyenne :	1,11

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
17 ans	55	34	27	27	47	104	273	491	672	485	231	106

COURS D'EAU : SANKARANI
 STATION : MANDIANA
 SUPERFICIE DU BASSIN : 21.900 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.672 mm
 sur 35 ans

Valeurs absolues Valeurs spécifiques
 m³/s l/s.km²

MODULE MOYEN estimé à partir
 d'une période de 51 ans de
 débits observés ou calculés

303

13,8

COEFFICIENT de VARIATION
 estimé dans les mêmes
 conditions

0,200

CRUES :

Maximum observé sur 4 ans

1.334

61

Crue décennale estimée à

(1.250)

(57)

Crue centenaire estimée à

((1.400))

((64))

Eventualité :

Maximum de fréquence d'apparition du 11 au 30 Septembre
 probablement

ETIAGES :

Valeurs spécifiques
 (l/s.km²)

Limite inférieure :

0,21

Valeur décennale :

0,30

Valeur la plus fréquente :

0,46

Valeur moyenne :

0,68

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

```

=====
Pér. : J : F : M : A : M : J : J : A : S : O : N : D :
-----
4 ans: 105: 62: 52: 44: 50: 132: 341: 719: 988: 870: 404: 193:
-----
=====

```

COURS D'EAU : SANKARANI
 STATION : GOUALA
 SUPERFICIE DU BASSIN : 35.300 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.587 mm
 sur 35 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
<u>MODULE MOYEN</u> estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	402	11,4
<u>COEFFICIENT de VARIATION</u> estimé dans les mêmes conditions		0,204

CRUES :

Maximum observé sur 4 ans	2.140	60,5
Crue décennale estimée à	(1.900)	(54)
Crue centenaire estimée à	((2.700))	((76))
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 11 au 30 Septembre proba-
 blement

ETIAGES :

	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	0,11
Valeur décennale :	0,16
Valeur la plus fréquente :	0,24
Valeur moyenne :	0,37

Débits mensuels pour la période d'observation (m³/s)

Pér.:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
4 ans:	120:	69:	50:	40:	46:	119:	300:	878:	1485:	1360:	629:	243:

COURS D'EAU	:	TINKISSO
STATION	:	TINKISSO
SUPERFICIE DU BASSIN	:	6.400 km ²
PLUVIOMETRIE MOYENNE sur 35 ans	:	1.562 mm

Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
---------------------------------------	--

MODULE MOYEN estimé à partir
d'une période de 51 ans de
débits observés ou calculés

85

13.3

COEFFICIENT de VARIATION
estimé dans les mêmes
conditions

0,098 ?

CRUES 22

Maximum observé sur 3 ans

315

48,3

Crue décennale estimée à

((350))

(55)

Crue centenaire estimée à

Eventualité :

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre proba-
blement.

ETIAGES :

Valeurs spécifiques
l/s.km²

Limite inférieure

Valeur décennale

Valeur la plus fréquente :

Résultats inutilisables

Valeur moyenne

Débits mensuels pour la période d'observations (m^3/s)

	Pér.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
3 ans	30	18	8,6	4,1	3,2	16,3	56	204	277	284	146	51	

COURS D'EAU	:	BAOULE
STATION	:	BOUGOUNI
SUPERFICIE DU BASSIN	:	15.700 km ²
PLUVIOMETRIE MOYENNE sur 35 ans	:	1.499 mm

Valeurs absolues m^3/s	Valeurs spécifiques $l/s.km^2$
-----------------------------	-----------------------------------

MODULE MOYEN estimé à partir
d'une période de 51 ans de
débits observés ou calculés

125

8.0

COEFFICIENT de VARIATION
estimé dans les mêmes
conditions

0.324

CRUES :

Maximum observé sur 2 ans

891

57

Crue décennale estimée à

((900))

((57))

Crue centenaire estimée à

Eventualité :

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre proba-
blement

Valeurs spécifiques
l/s.km²

ETIAGES :

Limite inférieure

3.

Valeur décennale

2

Valeur la plus fréquente

3

Valeurs incertaines

Valeur moyenne

⋮

Débits mensuels pour la période d'observations (m^3/s)

	Pér.:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2 ans:	19,8	9,5	5,3	1,7	2,0	5,0	41,5	390	558	550	215	75	

COURS D'EAU : BAOULE
 STATION : DIOILA
 SUPERFICIE DU BASSIN : 32.500 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.320 mm
 sur 37 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
MODULE MOYEN estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	204	6,28
COEFFICIENT de VARIATION estimé dans les mêmes conditions		0,276

CRUES :

Maximum observé sur 5 ans	1.580	49
Crue décennale estimée à	(1.270)	(39)
Crue centenaire estimée à	((2.500))	((77))
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre

ETIAGES :

	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	
Valeur décennale :	
Valeur la plus fréquente :	Valeurs incertaines
Valeur moyenne :	

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

	Pér.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
5 ans	64	33	19	10	4	29	119	554	981	762	362	141	

COURS D'EAU : BAGOE
 STATION : PANKOUROU
 SUPERFICIE DU BASSIN : 31.800 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.401 mm
 sur 35 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
<u>MODULE MOYEN</u> estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	250	7,9
<u>COEFFICIENT de VARIATION</u> estimé dans les mêmes conditions	0,314	

CRUES :

Maximum observé sur 2 ans	1.398	44
Crue décennale estimée à	((1.400))	((44))
Crue centenaire estimée à		
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre pro-
 bablement

ETIAGES :

	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	
Valeur décennale :	Valeurs incertaines
Valeur la plus fréquente :	
Valeur moyenne :	

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2 ans:	40	23,3	8,8	2,2	2,6	13,4	84	585	1080	979	384	139

COURS D'EAU : BANI
 STATION : DOUNA
 SUPERFICIE DU BASSIN : 101.600 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.264 mm
 sur 35 ans

Valeurs absolues Valeurs spécifiques
 m³/s l/s.km²

MODULE MOYEN estimé à partir
 d'une période de 51 ans de
 débits observés ou calculés

668

6,6

COEFFICIENT de VARIATION
 estimé dans les mêmes
 conditions

0,173

CRUES :

Maximum observé sur 8 ans

3.439

33,9

Crue décennale estimée à

3.040

30

Crue centenaire estimée à

(3.600)

(36)

Eventualité :

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 30 Septembre

Etalement de la courbe de fréquence vers la période postérieure

Valeurs spécifiques
 l/s.km²

ETIAGES :

Limite inférieure :

0,05 - 0,06

Valeur décennale :

0,10

Valeur la plus fréquente :

0,15 - 0,20

Valeur moyenne :

0,20 - 0,25

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

```

=====
: Pér.: J : F : M : A : M : J : J : A : S : O : N : D :
:-----:
:      :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :
:8 ans: 225: 128:  77:  46:  32:  52: 209:1298:2625:2710:1558: 542:
:      :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :   :
=====
  
```

COURS D'EAU : BANI
 STATION : BENENY-KEGNY
 SUPERFICIE DU BASSIN : 116.000 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.211 mm
 sur 35 ans

	Valeurs absolues m ³ /s	Valeurs spécifiques l/s.km ²
MODULE MOYEN estimé à partir d'une période de 51 ans de débits observés ou calculés	682	5,9
COEFFICIENT de VARIATION estimé dans les mêmes conditions	0,200	

CRUES :

Maximum observé sur 5 ans	4.032	34,8
Crue décennale estimée à	(3.200)	(28)
Crue centenaire estimée à	((4.500))	((39))
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 11 au 20 Octobre
 Etalement de la courbe de fréquence vers la période postérieure
 probablement

ETIAGES :

	Valeurs spécifiques l/s.km ²
Limite inférieure :	0,30 - 0,35
Valeur décennale :	0,35 - 0,39
Valeur la plus fréquente :	0,43
Valeur moyenne :	0,47 - 0,52

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

Pér.:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
7 ans:	291	163	111	82	69	84	189	1005	2229	3013	1866	743

COURS D'EAU : BANI
 STATION : SOFARA
 SUPERFICIE DU BASSIN : 129.400 km²
 PLUVIOMETRIE MOYENNE : 1.165 mm
 sur 35 ans

Valeurs absolues Valeurs spécifiques
 m³/s l/s.km²

MODULE MOYEN estimé à partir
 d'une période de 51 ans de
 débits observés ou calculés

512

4,0

COEFFICIENT de VARIATION
 estimé dans les mêmes
 conditions

0,130

CRUES :

Maximum observé sur 5 ans	1.644	12,7
Crue décennale estimée à	(1.620)	(12,5)
Crue centenaire estimée à	((1.750))	((13,5))
Eventualité :		

Maximum de fréquence d'apparition du 21 au 31 Octobre
 Etalement de la courbe de fréquence vers la période postérieure.

ETIAGES :

Valeurs spécifiques
 l/s.km²

Limite inférieure	:	0,12 - 0,15
Valeur décennale	:	0,15 - 0,19
Valeur la plus fréquente	:	0,19
Valeur moyenne	:	0,23

Débits mensuels pour la période d'observations (m³/s)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
6 ans:	405	177	100	59	38	50	174	828	1326	1538	1405	938

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- Rapports et archives de la Compagnie Générale des Colonies
- Rapports et archives de la Compagnie Générale du NIGER
- Rapports et archives du Ministère des Travaux Publics de la République du SOUDAN
- Rapports et documents inédits du Service Hydrologique de l'ORSTOM
- REFFAY, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
"Le Régime du NIGER" 1948
- LESGUILLONS et RODIER "Monographie Hydrologique du Cours Supérieur du NIGER" 1949
- RODIER, Ingénieur en Chef à Electricité de France
"Monographie du Régime Hydrologique du NIANDAN" 1955
- AUBERT, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées
"Amélioration de la navigation sur le NIGER" 1951
- FROLOW
 - Les périodicités de crues du NIGER à KOULIKORO. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences. Paris, 1931, t.192, p.973
 - L'Analyse des niveaux du NIGER et du NIL. C.R. Ac. Sc. Paris 1933 t. 197, p. 1736
 - Le NIGER moyen. Etude potamologique. Thèse ing. docteur, Fac. Sc. de Paris, 1934, p.161, fig.132
 - Une monographie du NIGER moyen. Annales de Géographie, 1935 p.206
 - Les problèmes du débit du NIGER. Annales de Physique du Globe de la France d'Outre-Mer, 1935, 12, p.181

- Sur l'application à l'Hydrologie de la méthode d'analyse de M. H. Labrousse. Bulletin n° 22 de l'Ass. Int. d'Hydrologie Scientifique. Paris 1937 (Niger : pp.482-483)
- Analyse des séries des cotes annuelles extrêmes du NIGER à KOULIKORO. Bull. de l'I.F.A.N. T. XVII, série A, n° 4, 1955 p. 953
- RODIER et TOUCHEBEUF de LUSSIGNY
"Evaporation sur les surfaces d'eaux naturelles en Afrique Noire Française" 1954
- MAIGNIEN, Directeur de Recherches à l'ORSTOM
"Contribution à l'étude du cuirassement des sols en Guinée Française"
Thèse de Doctorat présentée en 1958
- MILLOT "Les crues du NIGER". Annales de Géographie 1953
- ANNUAIRE HYDROLOGIQUE de la FRANCE d'OUTRE-MER
Années 1949 à 1957
Edité par l'OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE et
TECHNIQUE OUTRE-MER (Paris)

Géologie

- Carte géologique de reconnaissance (A.O.F.)
Feuille KANKAN Est au 1/500.000° (Goloubinow)
" BOUGOUNI Ouest au 1/500.000° (Goloubinow)
" KISSIDOUYOU Est au 1/500.000° (Obermüller)
- Carte géologique de la GUINEE forestière au 1/550.000°
- Carte géologique de la chaîne métamorphique de la Haute-GUINEE française au 1/250.000° (Obermüller)
- Rapport géologique de la campagne 1955 en COTE d'IVOIRE (Couture)
- Carte géologique internationale de l'AFRIQUE (1/5.000.000°)